



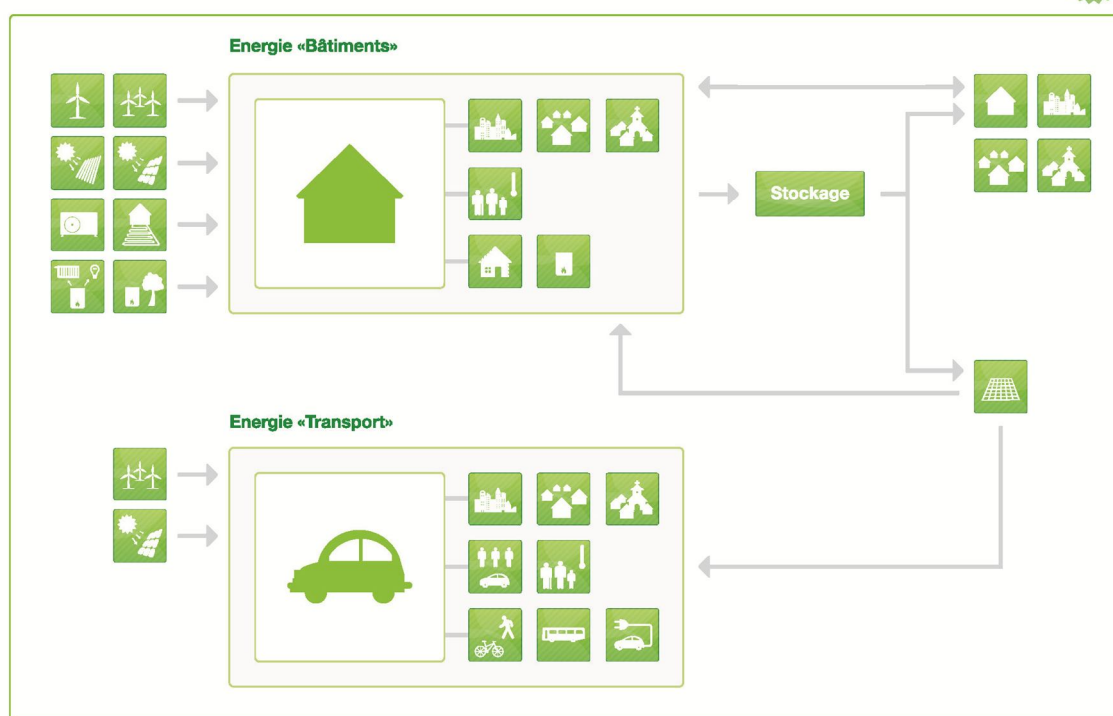
## Rapport scientifique et technique n°1

Recherches : Anne-Françoise Marique (LEMA-ULg), Tatiana de Meester et Simon Cuvellier (Architecture et climat-UCL)

Encadrement : Prof. André De Herde (Architecture et climat-UCL) et Prof. Sigrid Reiter (LEMA-ULg)

Date : 28 juin 2013

### Quartiers «Basse énergie»



---

**Coordonnées des équipes de recherches :**

Université de Liège  
LEMA  
Chemin des Chevreuils 1 B52/3  
4000 Liège

Prof. Sigrid Reiter  
Anne-Françoise Marique

Sigrid.Reiter@ulg.ac.be  
afmarique@ulg.ac.be

Université catholique de Louvain  
Architecture et climat  
Place du Levant, 1  
1348 Louvain-La-Neuve

Prof. André De Herde  
Simon Cuvellier

Andre.DeHerde@uclouvain.be  
Simon.Cuvellier@uclouvain.be

---

# 1.Introduction

Le présent rapport scientifique et technique présente les résultats de la première année (1<sup>er</sup> mai 2012 – 30 avril 2013) de la recherche SOLEN (SOLutions for Low Energy Neighbourhoods). Le projet de recherches SOLEN porte sur le développement de solutions visant à améliorer l'efficacité énergétique des quartiers résidentiels wallons existants, en ce qui concerne le bâti et la mobilité, et à y favoriser l'intégration des énergies renouvelables, pour tendre vers les objectifs quartiers à « (très) basse énergie » et quartiers « zéro-énergie ». L'objectif concret de la recherche est d'offrir un outil informatique interactif, accessible sur le Web, qui permette de déterminer les stratégies les plus efficaces pour réduire les consommations énergétiques globales (en énergie primaire) des quartiers résidentiels wallons existants, en phase d'utilisation et en cycle de vie. Ces solutions, adaptées et différenciées en fonction des tissus bâtis et de leurs caractéristiques, porteront sur la rénovation énergétique du bâti, sur les stratégies de mobilité et sur l'intégration des énergies renouvelables. Cet outil interactif se base sur l'outil développé dans le cadre du projet SAFE (Suburban Areas Favoring Energy efficiency, 2009-2012, programme mobilisation Energywall), disponible sur <http://www.safe-energie.be>, qui sera largement mis à jour et enrichi, notamment en ce qui concerne la prise en compte de nombreux motifs de transports et des chaînes de déplacements, l'extension significative de la base de données « bâtiments » pour inclure également les appartements, les bâtiments ruraux et urbains et la prise en compte de différents types d'énergies renouvelables dans le bilan énergétique global.

Le présent rapport scientifique et technique couvre, conformément au calendrier de la recherche (voir rapport administratifs n°1 et 2, à cet effet) les phases I et II de la recherche.

Le Chapitre 2 du présent rapport est ainsi dédié à un vaste état de l'art des objectifs « (très) basse énergie » et « zéro-énergie », à l'échelle des bâtiments et à l'échelle des quartiers. Le Chapitre 3 présente la typologie des quartiers et des bâtiments qui a été développée dans le cadre de la recherche. Le Chapitre 4 revient rapidement sur les particularités et les objectifs de l'outil interactif [safe-energie.be](http://www.safe-energie.be) et présente les amendements qui seront apportés dans le cadre de SOLEN ainsi que les données de fréquentation du site internet depuis sa mise en ligne, en juin 2012. Le Chapitre 5 présente les modifications et ajouts qui seront apportés à l'outil interactif [safe-energie.be](http://www.safe-energie.be) en ce qui concerne l'évaluation énergétique des bâtiments, de façon à prendre en compte tous les types de bâtiments représentatifs de l'ensemble du stock bâti résidentiel wallon. La méthode d'évaluation énergétique et son application systématisée sont présentées dans ce chapitre. Le Chapitre 6 présente les modifications qui seront apportées à l'outil [safe-energie.be](http://www.safe-energie.be) en termes d'évaluation énergétique des bâtiments, de façon à rendre cet outil indépendant des données provenant des recensements existants, à intégrer l'ensemble des motifs de déplacements quotidiens d'un individu ou d'un ménage et à prendre en compte les chaînes de déplacements. L'approche développée pour l'évaluation énergétique des déplacements, à l'échelle d'un quartier est présentée. Elle s'articule autour de la notion d'accessibilité de façon à intégrer une démarche plus

prospective, utile notamment dans le cadre de la construction d'un nouveau quartier. Le Chapitre 7 est consacré à l'évaluation de l'apport en énergies renouvelables de différents types, à l'échelle des bâtiments et à l'échelle des quartiers, qui constitue une des originalités du projet SOLEN et un apport majeur à l'outil existant safe-énergie.be. Les types d'énergies renouvelables qui sont investiguées dans ce cadre sont : le photovoltaïque, le solaire thermique, l'éolien, la biomasse et la cogénération. Chacune de ces énergies renouvelables fait l'objet d'un ou plusieurs modules permettant l'évaluation des gains énergétiques potentiels et d'une ou plusieurs fiches pratiques qui seront ajoutées à l'outil interactif. Le Chapitre 8 propose une synthèse des éléments principaux articulée autour de la définition d'un cadre conceptuel pour l'étude des quartiers résidentiels « (très) basse énergie » et « zéro-énergie ». Une première application de ce cadre conceptuel est proposée sur deux quartiers représentatifs (un quartier dense de centre-ville et un quartier périurbain peu dense) de façon à tester son applicabilité et à investiguer quelques premiers résultats principaux.

Ce rapport scientifique et technique n°1 se conclut (Chapitre 9) par une synthèse des principaux résultats obtenus lors de la première année de la recherche et par le développement de perspectives futures à investiguer lors de la seconde année de la recherche.

## 2.Phase I : Etat de l'art

### 2.1. Le projet SOLEN : rappel des objectifs et cadrage de la recherche

Le projet de recherche SOLEN (SOLutions for Low Energy Neighbourhoods) porte sur le développement de solutions visant à améliorer l'efficacité énergétique globale des quartiers résidentiels wallons existants, tant en ce qui concerne le bâti que la mobilité, ainsi qu'à y favoriser l'intégration des énergies renouvelables, dans le but de tendre vers les objectifs quartiers wallons « (très) basse énergie » et « zéro-énergie ». Le logement et le transport des personnes sont en effet deux secteurs particulièrement énergivores et émetteurs de gaz à effet de serre, aussi bien en Wallonie qu'en Europe. Dans le contexte actuel de prise de conscience des changements climatiques, réduire les consommations d'énergie dans ces deux secteurs apparaît souvent comme une cible politique importante. Force est toutefois de constater que les actions politiques les plus fortes et les recherches scientifiques semblent surtout axées sur la construction neuve, négligeant le potentiel de rénovation des bâtiments, les stratégies de mobilité et l'intégration des énergies renouvelables. Cependant, le stock bâti wallon présente des performances énergétiques médiocres (bâti ancien, peu ou pas isolé) et un taux de renouvellement faible ; c'est donc au niveau de la rénovation du stock existant, que réside le plus grand potentiel de réduction des consommations d'énergie des bâtiments. En outre, le développement de stratégies durables en termes de mobilité et d'utilisation des énergies renouvelables apporte un complément indispensable à l'étude énergétique du stock bâti existant, pour réduire à grande échelle les émissions de gaz à effets de serre.

Si la conception d'un bâtiment du point de vue énergétique a été largement analysée, peu de recherches se sont intéressées à l'efficacité énergétique à l'échelle de fragments urbains et les quelques études existantes suggèrent la possibilité de trouver une densité urbaine optimale du point de vue énergétique mais elles ne proposent pas de stratégies d'interventions sur les quartiers existants pour améliorer leur bilan énergétique. De plus, ces recherches ciblent souvent les centres historiques et les noyaux urbains denses alors que le stock bâti wallon est constitué de plusieurs types de quartiers (urbains, suburbains, ruraux) qui présentent des caractéristiques très différentes (densité, type de bâti, âge de construction, éloignement au centre-ville, mixité, etc.), qui ont une incidence directe sur les consommations d'énergie du bâti et des transports ainsi que sur le potentiel en énergies renouvelables.

La spécificité de ce projet de recherche consiste à étudier les interactions entre le milieu bâti, le transport et le potentiel en énergies renouvelables à l'échelle du quartier, ce qui est un sujet de recherche innovant et vise à combler un vide scientifique important. Ce projet développera des méthodes d'évaluation énergétique et des stratégies de réduction des consommations en énergie primaire (bâtiments + transport + énergies renouvelables) pour des quartiers existants, qui seront adaptées et différenciées en fonction des tissus bâtis (urbain, périurbain, rural) et de leurs caractéristiques.

Trois types de stratégies sont investiguées dans la recherche grâce à des outils de simulation thermique dynamique, d'analyse urbaine et de gisement solaire, d'analyse en cycle de vie et de traitement statistique : (1) les stratégies de rénovation énergétique des quartiers existants ; (2) la faisabilité de différentes sources d'énergie renouvelable et (3) les stratégies applicables en matière de déplacements et de mobilité. Les gains potentiels obtenus par chaque stratégie et pour différentes combinaisons de stratégies seront quantifiés, en phase d'utilisation et en cycle de vie, pour différents types caractéristiques de quartiers wallons, qu'ils soient urbains, périurbains ou ruraux. La faisabilité des objectifs « (très) basse énergie » et « zéro-énergie » sera investiguée de façon à anticiper les débats futurs sur l'actualisation de la Directive sur la performance énergétique des bâtiments.

De plus, il y a actuellement un manque crucial d'informations et d'outils rapides permettant aux concepteurs et aux décideurs de projets de rénovations urbaines de réduire les consommations d'énergie primaire de leurs projets, alors que le marché concerné est énorme et touche tous les acteurs wallons de la construction, de l'aménagement du territoire et des énergies renouvelables. Cette recherche consiste ainsi à coupler différents outils de simulation de pointe ainsi que des méthodes spécifiquement développées dans ce projet pour quantifier les consommations d'énergie primaire à l'échelle du quartier et évaluer différents scénarios d'amélioration de leurs performances énergétiques.

L'objectif concret de la recherche est, dans ce contexte, d'offrir un outil informatique interactif, accessible sur le Web, qui permette de déterminer, pour une combinaison donnée de critères (type de quartier (urbain, périurbain, rural), densité, caractéristiques et âge du bâti, éloignement au centre-ville, mixité, etc.) les stratégies de rénovations énergétiques les plus efficaces, tant en ce qui concerne la rénovation des bâtiments, que la mobilité des habitants et le recours aux énergies renouvelables, en vue d'améliorer la performance énergétique de ces tissus et de réduire les émissions de gaz à effet de serre à l'échelle des quartiers. Cet outil se développera sur base de l'outil développé dans le cadre du projet SAFE (Suburban Energy Favoring Energy efficiency, 2009-2012, programme mobilisateur Energywall) qui sera largement enrichi et complété. Cet outil sera l'aboutissement d'une recherche scientifique de pointe, basée sur différents types de modélisations urbaines (bâtiments + transport + énergies renouvelables) en phase d'utilisation et en cycle de vie.

Cet outil comprendra également :

- Des indicateurs d'évaluation de l'efficacité énergétique des quartiers wallons (urbains, périurbains et ruraux);
- Des développements méthodologiques et techniques pour améliorer l'efficacité énergétique des quartiers existants selon trois axes : bâtiments, mobilité et énergies renouvelables;
- La mise en évidence des scénarios de renouvellement les plus adaptés, selon le type de quartier, et leur incidence sur le cycle de vie des quartiers;
- Des conseils et méthodes de planification pour les futurs développements et les opérations de rénovation ;

- La mise en évidence des services et technologies qu'il serait utile de développer en Région wallonne pour améliorer l'efficacité énergétique globale des quartiers.

Ces différentes orientations ont pour but d'offrir un diagnostic du milieu existant, de proposer des solutions réalistes différenciées basées sur les caractéristiques des quartiers et de fournir des pistes de développements futurs de qualité, tant en ce qui concerne la rénovation du bâti et la mobilité des habitants que le recours aux énergies renouvelables. Cet outil devrait faciliter la mise en œuvre de projets de rénovations énergétiques de quartiers wallons visant les performances de quartiers à « (très) basse énergie », voire « zéro-énergie ».

Cet outil interactif répond à une demande réelle des entreprises et des autorités wallonnes. Il participera à l'évolution des politiques d'aménagement du territoire à l'échelle du quartier et des pratiques de conception et de rénovation des quartiers urbains, suburbains et ruraux wallons ainsi qu'à la sensibilisation du plus grand nombre d'acteurs du territoire, en ce y compris les citoyens, à ces enjeux. Il permettra d'évaluer rapidement les impacts de différentes stratégies d'intervention, ce qui comblera le besoin actuel, confirmé dans la littérature scientifique (Glicksman 2003 ; Tweed & Jones 2000 ), d'outils pratiques peu exigeants en ressources (logiciel, temps de modélisation et de calcul, formation, etc.) destinés à tous les acteurs de l'aménagement du territoire

Le projet SOLEN comprend en outre un travail de sensibilisation et de transmission pour valoriser les résultats de cette recherche. La diffusion de l'outil développé vers un grand nombre d'acteurs du territoire soutiendra l'appropriation des solutions par les concepteurs, les décideurs et les citoyens. L'outil permettra aux professionnels (architectes, bureaux d'études, aménageurs, promoteurs, développeurs et installateurs d'énergies renouvelables) et aux autorités publiques en charge de l'énergie et de l'aménagement du territoire de déterminer rapidement les actions à mener et les techniques les plus efficaces à utiliser, selon le type de quartier dans lequel ils interviennent, notamment lors de la planification de projets de rénovation ou de l'instruction de demandes de permis. Les ménages y trouveront des résultats chiffrés et des pistes concrètes pour améliorer l'efficacité énergétique de leur logement et de leurs déplacements.

Le projet SOLEN est réalisé par le LEMA (Local Environment : Management & Analysis de l'Université de Liège ; coordinateur de la recherche) et Architecture et Climat (Université catholique de Louvain). Deux parrains industriels, les bureaux d'études MATRICiel et Ecorce suivent la recherche.

## **2.2. Les objectifs « (très) basse énergie », « passif » et « zéro-énergie » : état de l'art**

### **2.2.1. Introduction**

Les objectifs « (très) basse énergie », « passif » et « zéro-énergie » (Zero-Energy) sont des concepts couramment rencontrés dans la littérature scientifique et dans la pratique, en ce qui concerne l'échelle du bâtiment individuel. Ils constituent des objectifs primordiaux

pour la conception future des bâtiments, en tentant de répondre à un certain nombre d'enjeux relatifs à la mutation de notre cadre bâti vers un modèle plus durable.

Pourtant, on remarquera que (1) les concepts « zéro-énergie », « passif » et « (très) basse énergie » ne sont pas définis de façon univoque et précise dans la littérature ou les réglementations et (2) que les travaux portant sur l'objectif « zéro-énergie », tout comme ceux relatifs plus largement aux objectifs « (très) basse énergie » et « passif », à une échelle plus large que celle du bâtiment individuel sont très peu nombreux.

Dans ce contexte, les trois sections suivantes (2.2.2 à 2.2.4) ont pour objectif de présenter une synthèse des travaux existants relatifs à la définition des objectifs « (très) basse énergie », « passif » et « zéro-énergie », essentiellement à l'échelle du bâtiment. La section 2.2.5. propose ensuite quelques réflexions relatives à l'échelle du quartier, à ses spécificités et à ses intérêts. La dernière section (2.2.6) synthétise enfin les définitions adoptées dans le cadre du projet de recherches SOLEN

### **2.2.2. L'objectif « basse énergie »**

Les niveaux « basse énergie » et « très basse énergie » ne font l'objet d'aucune définition universelle et sont en continuelle évolution car, à l'origine, tous les bâtiments qui ont été qualifiés de « basse énergie » étaient simplement plus économes en énergie que ce qu'imposait la norme au moment de leur construction. Les critères d'évaluation du besoin d'énergie ne sont pas définis. Cette notion est très floue et variable suivant le moment et le lieu (Massart et De Herde 2010). Pour Thiers (2008), le standard « basse énergie » se caractérise également par des besoins énergétiques plus faibles que les bâtiments standards. Il s'obtient par optimisation de l'isolation, la réduction des ponts thermiques et l'accroissement des apports passifs et ne comprend a priori aucun moyen de production local d'énergie, sans toutefois l'exclure.

Ces standards « basse énergie » et « très basse énergie » sont rencontrés dans la pratique. On remarquera notamment les définitions suivantes :

#### En Région Bruxelles capitale

La région de Bruxelles capitale octroie depuis quelques années, différentes primes pour les rénovations dont une prime pour la rénovation « basse énergie » des bâtiments résidentiels et une autre pour la rénovation « très basse énergie » de bâtiments résidentiels, et pour les rénovations passives comme il en sera question dans la section suivante (IBGE, Prime énergie B10b bâtiment passif ou rénovation basse énergie bâtiments résidentiels, 2012). Dans le cadre de rénovations, les exigences demandées sont les suivantes :

- En rénovation basse énergie, les besoins de chauffage doivent être inférieurs ou égaux à 60 kWh/m<sup>2</sup>.an.
- En rénovation très basse énergie, les besoins de chauffage doivent être inférieurs ou égaux à 30 kWh/m<sup>2</sup>.an.

Les performances énergétiques de référence ainsi que toutes les conventions de mesure et de calcul sont reprises dans le vade-mecum PHPP version 2012 ou plus récent qui



permet d'obtenir ces primes (Feist, 2007).

Dans le guide « Elaboration d'un outil d'aide à la conception de maisons à très basse consommation d'énergie »

Massart et De Herde (2010) ont mis en évidence, dans le guide sous objet, le flou des différentes définitions. En tenant compte des performances actuelles des nouvelles constructions, le choix des auteurs s'est orienté vers une optique de conception de maisons et non pas de rénovation.

La définition de la maison à très basse consommation d'énergie retenue par Massart et De Herde (2010) exige :

- un besoin net d'énergie de chauffage inférieur ou égal à 38 kWh/m<sup>2</sup>.an, calculé par le logiciel PHPP ;
- un taux de perméabilité à l'air  $\eta_{50}$  inférieur ou égal à 1 h<sup>-1</sup> (ce qui correspond à  $\eta=0.05$  [h<sup>-1</sup>]). Cette hypothèse d'étanchéité répond aux conseils du CSTC en matière d'efficacité de la récupération de chaleur sur un système de ventilation double flux.

Selon le gouvernement fédéral

Compte tenu des performances qu'atteignent les nouvelles constructions, le gouvernement fédéral a défini le « basse énergie » de la façon suivante, dans le cadre de la réduction d'impôts pour les habitations « basse énergie », « passive » et « zéro-énergie » :

« On entend par habitation « basse énergie », une habitation sise dans un Etat membre de l'Espace économique européen dont la demande énergétique totale pour le chauffage et le refroidissement des pièces doit rester limitée à 30kWh/m<sup>2</sup> de superficie climatisée. » (SPFF, Réduction d'impôts pour habitation basse énergie, passive et zéro énergie)

**2.2.3. L'objectif « passif »**

Le standard « passif » fait l'objet d'un corps important de la littérature. Il est notamment défini par la Plate-forme Maison Passive (2012) qui certifie également ces bâtiments. Pour être certifié passif, les critères précis auxquels un logement doit répondre, sont :

- Les besoins en énergie pour le chauffage doivent être inférieurs ou égaux à 15 kWh/m<sup>2</sup>.an, soit l'équivalent de 1,5 litres de mazout par mètre carré et par an (calcul avec le logiciel PHPP).
- Le résultat du test blower door (étanchéité à l'air) doit être inférieur ou égal à 0,6 h<sup>-1</sup> (taux de renouvellement d'air mesuré à une différence de 50 Pascals).
- Le pourcentage de surchauffe dans le bâtiment (plus de 25°C) doit être inférieur ou égal à 5% (calcul avec le logiciel PHPP).
- En Région Bruxelles Capitale uniquement, une condition supplémentaire est posée quant à l'énergie primaire du bâtiment qui doit rester inférieure ou égale à 45 kWh/m<sup>2</sup>.an pour le chauffage, l'eau chaude sanitaire et les auxiliaires (calcul avec le logiciel PHPP).

Pour Thiers (2008), le « bâtiment passif » est très faiblement consommateur d'énergie et ne nécessite pas de systèmes de chauffage ou de refroidissement actifs : les apports solaires passifs et internes et les systèmes de ventilation suffisent à maintenir une ambiance intérieure confortable toute l'année. Ce concept inclut également une réduction des besoins en électricité spécifique et éventuellement une production d'électricité à base de sources d'énergies renouvelables. En pratique, un chauffage d'appoint est souvent nécessaire.

Notons que le standard « passif » belge ne prend pas en compte l'utilisation totale de l'énergie primaire ce qui est le cas par exemple en Allemagne ou en Angleterre. Cette exigence implique que la consommation d'énergie primaire spécifique pour toutes les applications domestiques (chauffage, eau chaude et électricité domestique) ne doit pas dépasser 120 kWh/m<sup>2</sup>.an au total (le calcul est effectué conformément au PHPP (Feist, W., 2007, <http://passiv.de>, 2012). On remarquera également que certains pays (notamment l'Allemagne) adaptent certains critères, comme l'étanchéité à l'air, dans le cas de rénovations passives.

#### **2.2.4. L'objectif « zéro-énergie »**

Le « Bâtiment zéro-énergie » est un domaine de recherches récent et porteur qui fait l'objet, depuis quelques années, de nombreuses publications visant à le définir et à développer des méthodologies de calcul adaptées (Marszal et al., 2011, Sartori et al., 2012). Les technologies nécessaires pour sa mise en place sont connues et développées. La faisabilité concrète de l'objectif « Bâtiment zéro-énergie », en construction neuve comme en rénovation, dépend largement de la localisation, de l'orientation et de la structure urbaine au sein de laquelle il se trouve. Des scénarios de développements de « Bâtiments zéro-énergie » sont notamment proposés à grande échelle, notamment aux Etats-Unis via l'Energy Independence and Security Act (2007), en ce qui concerne les bâtiments commerciaux. En Europe, la Directive sur la Performance Energétique des Bâtiments en a fait son objectif pour tous les bâtiments publics neufs construits après 2018 et pour l'ensemble des bâtiments neufs construits après 2020. Elle incite également les Etats membres à prendre des mesures visant à l'implémentation progressive du « zéro-énergie » en rénovation. Les Etats membres fixent également des objectifs pour 2015 et pour 2020 quant au pourcentage minimum de bâtiments devant être des bâtiments dont la consommation nette d'énergie est nulle, exprimés en pourcentage du nombre total de bâtiments et en pourcentage de la superficie utile totale (PEB Parlement européen, 2009). Un nombre croissant de « Bâtiments zéro-énergie » sont développés internationalement. Ils concernent des bâtiments neufs et plus rarement des rénovations (Voss et al., 2011, IEA, 2012).

De nombreuses définitions sont ainsi proposées pour tenter d'approcher le concept du « net zero energy buildings » (NZEB) et ses connections aux réseaux énergétiques. La seule satisfaction d'un équilibre annuel ne suffit pas à caractériser pleinement le NZEB et l'interaction entre les bâtiments et les réseaux énergétiques doivent être abordées. Différentes définitions sont évidemment rencontrées en fonction des politiques ciblées par les différents pays et des conditions spécifiques locales (ex : le climat, les traditions constructives, etc.). Un cadre général est présenté afin d'établir ces définitions. Il est

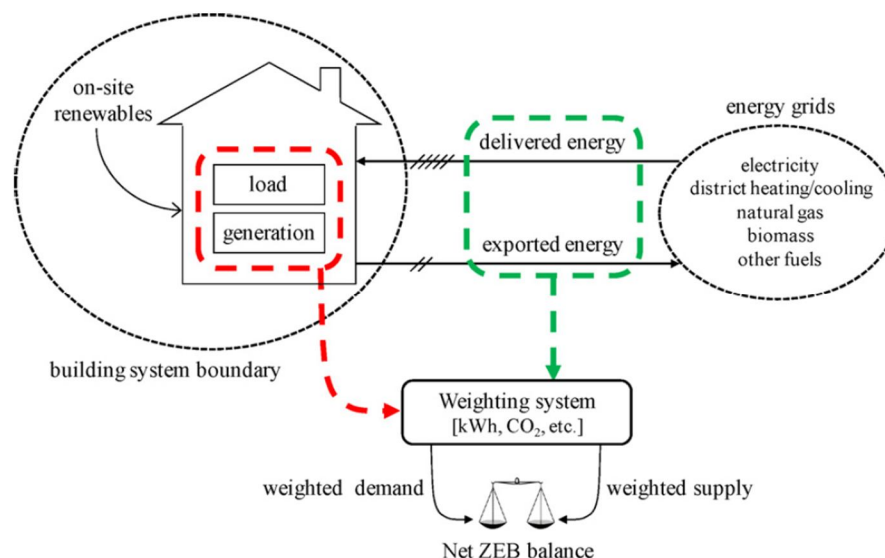
composé de critères. L'évaluation des critères dans le cadre d'une définition et la sélection des options liées à ceux-ci permettent d'établir une méthodologie pour établir des définitions des NZEB d'une manière systématique. La notion d'équilibre est central dans le cadre de la définition et deux grands types d'équilibre sont identifiés, à savoir l'équilibre import/export et l'équilibre besoin/production.

En ce qui concerne le « match » énergétique temporel, deux caractéristiques majeures doivent être prises en compte afin d'optimiser la capacité des NZEB pour répondre à ses propres besoins par la production in situ et pour « travailler » avantageusement par rapport aux besoins des réseaux locaux. Les indicateurs possibles seront présentés et le concept de la flexibilité des interactions avec les réseaux est un objectif souhaitable dans la conception énergétique du bâtiment.

Les avis divergent beaucoup sur la définition commune de ce concept. Il y a une compréhension conceptuelle d'un ZEB comme un bâtiment économe en énergie capable de produire de l'électricité ou d'autres vecteurs énergétiques à partir de sources renouvelables afin de compenser sa demande d'énergie. Par conséquent, il est implicite que l'accent soit mis sur des bâtiments qui sont connectés à une infrastructure énergétique et non sur des bâtiments autonomes (Marszal et al., 2012). Pour ce qui concerne le terme NZEB, il peut être utilisé pour se référer à des bâtiments qui sont connectés à des infrastructures énergétiques, tandis que le terme ZEB est plus général et peut aussi bien inclure les bâtiments autonomes. Le libellé «Net» souligne le fait qu'il y a un équilibre entre l'énergie prise sur les réseaux énergétiques et celle fournie à ces mêmes réseaux sur une période de temps déterminée, théoriquement par an en retour.

#### 2.2.4.1. La définition de l'équilibre d'un NZEB et la terminologie associée, dans la littérature scientifique

La figure ci-dessous, empruntée à Sartori et al. (2012), propose une vue d'ensemble du concept NZEB et de la terminologie portant sur l'utilisation de l'énergie dans les bâtiments et sur les connexions entre les bâtiments et les réseaux énergétiques.



*Figure 1: Schéma de principe des connections entre le bâtiment et les réseaux (Sartori et al., 2012)*

Sartori et al. (2012) définissent les différents termes utilisés dans ce schéma global de la façon suivante :

- Building system boundary (les limites du système): Il s'agit de définir les limites du système dans lequel seront comparés les flux d'énergie entrant et sortant. Cela inclut :
  - Physical boundary : les limites physiques peuvent inclure un bâtiment seul ou un groupe de bâtiments et permettent de déterminer si les ressources en énergies renouvelables proviennent du site « in situ » ou pas « hors site ».
  - Balance boundary : (es limites de l'équilibre déterminent quelles sont les énergies utilisées (par exemple, le chauffage, le refroidissement, la ventilation, l'ECS, la lumière, etc.) qui sont considérées dans le calcul de l'équilibre.
- Energy grids (or simply 'grids') : les réseaux d'énergie représentent le(s) système(s) d'alimentation des vecteurs énergétiques tel que ceux utilisés pour l'électricité, le gaz naturel, les réseaux thermiques pour le chauffage/refroidissement d'un quartier, la biomasse ou d'autres types de combustibles. Un réseau peut être à deux voies, c'est-à-dire qu'il fournit de l'énergie à un bâtiment et en reçoit en retour de celui-ci (ex. : pour des réseaux électriques et des réseaux thermiques).
- Delivered energy : l'énergie véhiculée des réseaux vers le bâtiment, chacune spécifiée par un vecteur d'énergie en kWh/an ou kWh/m<sup>2</sup>.an.
- Exported energy : l'énergie véhiculée du bâtiment vers les réseaux, chacune spécifiée par un vecteur d'énergie en kWh/an ou kWh/m<sup>2</sup>.an.
- Load : la demande d'énergie du bâtiment, spécifiée par vecteur d'énergie en kWh/an ou en kWh/m<sup>2</sup>.an. La charge peut ne pas coïncider avec l'énergie fournie par les réseaux grâce à la consommation de l'énergie produite sur place.
- Generation : la production d'énergie du bâtiment, précisée par chaque vecteur d'énergie en kWh/an ou kWh/m<sup>2</sup>.an. La production peut ne pas coïncider avec l'énergie exportée grâce à la consommation d'énergie produite sur place.
- Weighting system : un système de pondération convertit les unités physiques dans d'autres mesures, par exemple la comptabilité de l'énergie utilisée (ou émissions rejetées) pour extraire, produire et fournir l'énergie. Les facteurs de pondération peuvent aussi refléter des préférences politiques plutôt que des considérations purement scientifiques ou d'ingénierie.
- Weighted demand : la somme de toute l'énergie importée (ou charge/demande), obtenue en additionnant la contribution de tous les vecteurs énergétiques, pondérés par leur facteur de pondération respectif.
- Weighted supply : la somme de toutes les énergies exportées (ou la production), obtenue en additionnant la contribution de tous les vecteurs énergétiques pondérés par leur facteur de pondération respectif.
- Net ZEB balance : la condition d'équilibre est satisfaite lorsque le « weighted supply » atteint ou dépasse la « weighted demand » pendant une période de temps fixée, théoriquement un an. L'équilibre ou bilan NZEB peut être déterminé soit à partir de l'équilibre entre l'énergie importée et exportée (équilibre

import/export), soit à partir de l'équilibre entre la demande et la production (équilibre load/generation). L'équilibre Net ZEB est calculé comme suit (équation (1)), des valeurs absolues sont utilisées pour éviter une confusion selon que l'import ou l'export soit positif ou pas.

$$(1) \text{ Net ZEB balance : } | \text{weighted supply} | - | \text{weighted demand} | > \text{ou} = 0$$

On remarquera enfin que les équilibres mensuels (monthly net balance) (et horaires dans certains cas) devraient également être étudiés, en complément du bilan annuel et selon la même formule, en utilisant les valeurs mensuelles (ou horaires) de charge et de production, de façon notamment à prendre en compte les décalages entre production et consommation et investiguer la nécessaire question du stockage de l'énergie, considérant que renvoyer le surplus d'énergie d'un bâtiment ou d'un groupe de bâtiments ZE vers le réseau n'est envisageable que tant que les bâtiments ZE ne sont pas nombreux et ne peut être considéré comme une solution optimale à terme (Marique et al. 2013c).

L'équilibre entre flux importés et exportés et l'équilibre entre besoins et productions se trouvent généralement présentés par un graphe représentant en abscisse, les besoins, ce qui est importé, fourni de l'extérieur au site et en ordonnée ce qui est produit, et peut être placé sur le réseau (voir figure ci-dessous à gauche). La figure ci-dessous à droite illustre cette représentation du concept ZE pour un ensemble de bâtiments (Attia, 2012). On voit très clairement que durant les périodes de novembre à février, les bâtiments dépendent des réseaux alors que durant le reste de l'année, ils deviennent producteurs et peuvent de ce fait alimenter les réseaux en restituant le surplus d'énergie afin de « restituer » l'énergie consommée durant l'hiver. L'oblique représente la zone d'équilibre entre ce qui est consommé et ce qui est produit. Si le bilan annuel d'un bâtiment se trouve au-dessus de cette limite, le bâtiment sera à énergie positive.

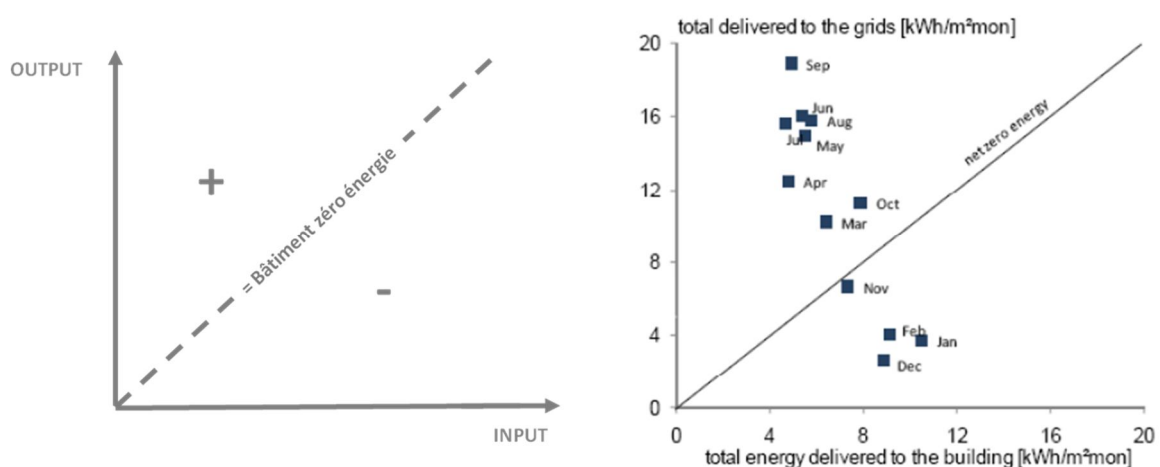


Figure 2 : Illustration du concept de base du « zéro-énergie » à gauche et application concrète pour un cas (Attia, 2012)

Cette représentation graphique de l'équilibre du NZEB peut être exploitée comme ci-dessous, où, en partant d'un bâtiment de référence (« reference building »), qui peut représenter un bâtiment construit selon les exigences minimales autorisées dans un pays (par exemple en respectant la PEB actuelle en Belgique) ou encore, un bâtiment qui peut représenter la performance d'un bâtiment existant avant d'être rénové. Partant de la position de ce cas de référence, le chemin vers le « zéro-énergie » est donné par l'équilibre de 2 actions :

- La réduction de la demande (suivant l'axe des x) par le biais de mesures d'efficacité énergétique.
- La production d'électricité ainsi que celle des vecteurs d'énergie thermique à l'aide des différentes options d'exportation des énergies afin d'obtenir suffisamment de crédits pour atteindre l'équilibre (axe des y).

La valeur présentée par la verticale traduit donc l'énergie qu'il est nécessaire de fournir au réseau pour atteindre ce niveau NZEB ce qui implique et donc définit un certain niveau de performance de la part du bâtiment.

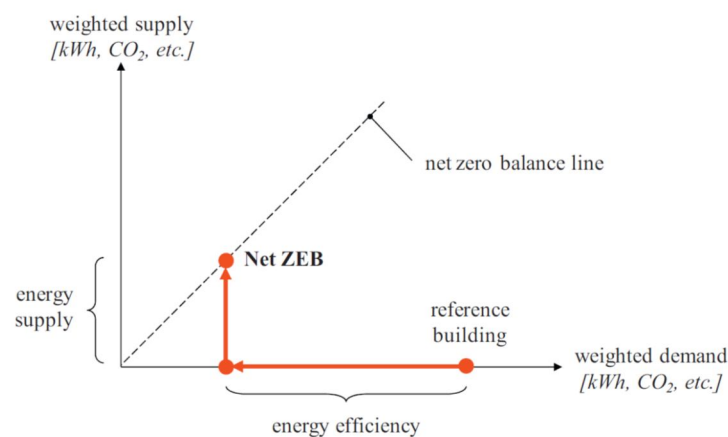


Figure 3 : Représentation graphique du concept de l'équilibre du net ZEB (Sartori et al., 2012)

Une représentation graphique encore plus complète est présentée sur le graphique ci-dessous. Ici le cycle complet est illustré ainsi que deux équilibres atteignables : l'équilibre entre la demande et la production et l'équilibre entre l'import et l'export. Les deux paramètres principaux sur lesquels il est possible de « jouer » sont les performances énergétiques du ou des bâtiments et la production des ressources in situ.

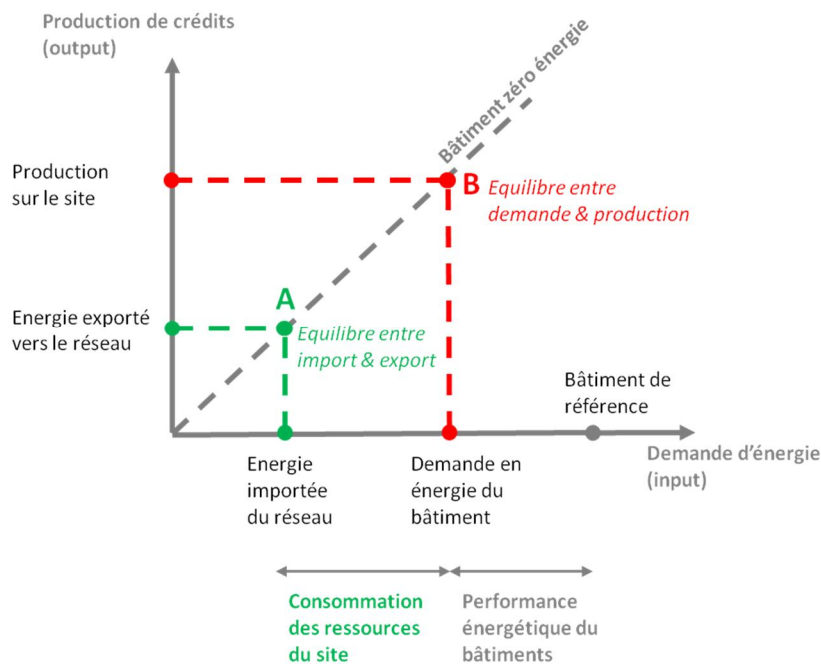


Figure 4 : Schéma complet du principe du « zéro-énergie » (Architecture et climat, 2012).

Torcellini et al. (2006) distinguent quant à eux plusieurs définitions du « bâtiment zéro-énergie » selon l'objectif fixé :

- « Net zero site energy » : l'équilibre est réalisé entre la consommation finale<sup>1</sup> d'énergie consommée par le bâtiment et l'énergie renouvelable qu'il produit par an.
- « Net zero source energy » : l'équilibre tient compte de la consommation d'énergie primaire<sup>2</sup> du bâtiment.
- « Net zero energy cost » : l'équilibre est réalisé entre le montant d'« pensé par le propriétaire pour sa consommation énergétique, et ce qu'il reçoit pour l'exportation de l'énergie qu'il produit à l'aide d'énergies renouvelables.
- « Net zero energy emission » : l'équilibre est atteint entre l'utilisation des énergies renouvelables et la compensation énergétique du bâtiment, en ce qui concerne les émissions de gaz à effet de serre.

Thiers (2008) distingue :

- Le bâtiment « producteur d'énergie » ou « near zero energy house » : il est doté de

<sup>1</sup> L'énergie finale représente la quantité de combustible (litre de mazout, m<sup>3</sup> de gaz ou encore stère de bois) nécessaire pour chauffer un bâtiment, etc. On passe de l'énergie finale à l'énergie primaire en tenant compte de facteurs de conversion en énergie primaire (fp) égaux à 1 pour les combustibles fossiles et la biomasse, 1,8 pour l'électricité produite par cogénération à haut rendement et 2,5 pour l'électricité ([www.maisonpassive.be](http://www.maisonpassive.be)).

<sup>2</sup> L'énergie primaire représente l'énergie qui est réellement prélevée à la planète. On tient compte, entre autre, du transport et du raffinage du combustible, du rendement de production des centrales pour l'électricité, etc... Notons également que ces valeurs sont différentes d'un pays à l'autre. Cela est essentiellement dû aux modes de production de ces énergies mais également aux décisions politiques et économiques propre à chaque pays ([www.maisonpassive.be](http://www.maisonpassive.be)).

moyens de production d'énergie locaux. Cette dénomination se spécifie cependant pas le niveau de consommation du bâtiment ni le part de cette consommation couverte par la production, ni la nature de l'énergie produite. Il s'agit plutôt d'une caractéristique du bâtiment que d'un concept de bâtiment.

- Le bâtiment « zéro énergie » ou « net zero energy house » : il combine de faibles besoins d'énergie à des moyens de production locaux. Sa production énergétique équilibre sa consommation si celle-ci est considérée sur une année. Son bilan énergétique annuel est donc nul (Bernier, 2006)
- Le bâtiment « à énergie positive » : c'est un bâtiment producteur d'énergie qui dépasse le niveau « zéro énergie » : il produit globalement plus d'énergie qu'il n'en consomme. Comme le précédent, il peut être raccordé à un réseau de distribution de l'électricité vers lequel il exporte son surplus de production.
- Le bâtiment « autonome » : sa fourniture énergétique ne dépend d'aucune ressource distante. La totalité de l'énergie consommée par le bâtiment est produite sur place à partir de ressources locales. En pratique, le bilan net d'énergie de ce bâtiment est nul à tout instant. Un tel bâtiment se passe des avantages apportés par les réseaux (foisonnement, sécurité d'approvisionnement) ce qui impose l'usage de moyens de stockage d'énergie (batterie d'accumulateurs, inertie thermique, etc.) Il est particulièrement adapté aux sites isolés ou insulaires car il évite les coûts de raccordements aux réseaux.

#### 2.2.4.2. Quelques définitions opérationnelles existantes

##### Définition du Parlement européen

Au vue des objectifs énoncés précédemment, le Parlement Européen a défini le « zéro-énergie » ou plutôt les « bâtiments dont la consommation nette d'énergie sont nulles » dans l'article 2 d'un texte adopté le 23 avril 2009 (PEB Parlement européen, 2009 et EPBD) :

##### *« Article 2 – Définitions*

*Aux fins de la présente directive, on entend par:*

*[...]*

- 4) *"bâtiment dont la consommation nette d'énergie est nulle": un bâtiment dont la consommation annuelle globale d'énergie primaire est inférieure ou égale à la production locale d'énergie à partir de sources renouvelables, du fait de son niveau d'efficacité énergétique très élevé;*

*[...] »*

Cette définition n'envisage donc pas que le « zéro-énergie » au sens d'un équilibre mais également les bâtiments à énergie positive. Soulignons que le bilan se fait en considérant la consommation d'énergie primaire.

L'article 9 de la refonte de la Directive Européenne sur la Performance Energétique des Bâtiments (ECEEE, 2011) définit le « bâtiment à énergie quasi nulle » comme *« un bâtiment dont la quantité quasi nulle ou très basse d'énergie requise devrait être couverte dans une très large mesure pas de l'énergie produite à partir de sources renouvelables, notamment l'énergie produite à partir de sources renouvelables sur place ou à*



proximité ».

#### Définition du gouvernement fédéral belge

Le gouvernement fédéral belge a également défini le « zéro-énergie » dans le cadre de la « Réduction d'impôts pour habitation basse énergie, passive et zéro énergie » (SPF Finances, 2012) :

*« On entend par habitation zéro énergie, une habitation sise dans un Etat membre de l'Espace économique européen et*

- qui répond aux conditions d'une habitation passive et*
- dans laquelle la demande résiduelle d'énergie pour le chauffage et le refroidissement des pièces est compensée totalement par l'énergie renouvelable produite sur place. »*

Il s'agit d'une première définition qui devrait évoluer dans le futur.

Cette définition belge a déjà fait office de plusieurs critiques relevant certaines faiblesses (Mlecnik et al., 2011, Attia et al., 2012, Van Moeseke et al., 2012) :

- Les besoins considérés pour obtenir l'équilibre « net zéro » sont limités aux seuls besoins de chaud et de froid.
- L'application et la méthode de calcul sont différentes au niveau régional, ce qui crée des définitions divergentes au niveau national.
- La définition est actuellement basée sur le standard « maison passive », qui n'est pas compatible avec la définition de la PEB et qui ne prend pas en compte d'autres manières d'atteindre un équilibre « net zéro », notamment avec des bâtiments basses consommations plutôt que passifs.
- Le standard belge « maison passive » exclut la règle limitant à 120 kWh/m<sup>2</sup>.an la consommation d'énergie primaire totale qui inclut tous les appareils (plug loads) et l'éclairage. Remarquons que les facteurs de conversion spécifiques au combustible et destinés à être utilisés lors du calcul de l'énergie primaire, peuvent considérablement influencer l'évaluation des bâtiments et le calcul des émissions de dioxyde de carbone.
- La définition est très liée au standard « maison passive », ce qui a des répercussions sur le critère de confort utilisé. Par exemple, le critère de confort d'été sur la demande de refroidissement est inclus dans la certification belge « maison passive », mais cela ne permet pas l'adoption d'autres modèles de confort par exemple, l'adaptation du modèle de confort européen (EN 15251, 2007) ou encore l'utilisation de résultats issus de simulations sur la physique du bâtiment ce qui est demandé pour les bâtiments non résidentiels. La définition statique du confort liée à la reprise du standard « maison passive » n'exploite pas entièrement la norme EN15251.
- L'importance de la consommation d'électricité est largement négligée. Le standard belge « maison passive » et la définition du « zéro-énergie » incluent le chauffage et le refroidissement, mais pas les auxiliaires électriques, l'éclairage et les appareils ménagers du bâtiment, etc. (Notons qu'en allant plus loin, on pourrait aussi envisager

de considérer l'énergie grise liée aux matériaux et composants mis en œuvre).

- La définition actuelle est axée uniquement sur les logements. Elle n'aborde pas les autres types de bâtiments (commerciaux, tertiaires, etc.) et elle néglige la réhabilitation et la rénovation de bâtiments patrimoniaux et historiques.
- Les sources d'énergies renouvelables considérées dans le bilan énergétique sont limitées aux pompes à chaleur sur site, aux installations de panneaux solaires thermiques et photovoltaïques.
- La définition ne tient pas compte du « matching » et du « stockage d'énergie » (annuel, mensuel et journalier), de la production sur le site par rapport à celle à l'extérieur du site et des interactions et connectivités aux réseaux. Une question importante à développer dans la suite des recherches sur le « zéro-énergie » est le stockage d'énergie sur le « smart grid » belge et le marché des changes.
- La définition ne tient pas compte des communautés ou quartiers « zéro-énergie » et des synergies qui peuvent se produire à partir de la mise en œuvre de systèmes de chauffage/refroidissement au niveau du quartier. De plus, le standard « maison passive » est avantagé par les gains solaires ce qui implique des morphologies urbaines qu'elles permettent l'accès au soleil. Cette question est un défi dans les villes belges et pour les politiques urbaines.
- La définition n'aborde pas de systèmes permettant d'assurer une qualité fiable, ni de procédures d'un monitoring pour garantir une qualité physique de la réalisation de la construction et en même temps, de la performance du bâtiment « zéro-énergie ».

Ces critiques s'accompagnent de suggestions pour accompagner et compléter la réflexion afin de développer une meilleure définition à établir.

Van Moeseke et al. (2012) proposent ainsi : « [...] d'oublier les slogans « zéro-énergie » et « énergie positive » pour parler simplement de la performance énergétique des bâtiments. Nous définissons cette performance énergétique comme le résultat de la conception et de la réalisation d'un bâtiment permettant à la fois (1) de faire tendre vers zéro les besoins énergétiques liés à leur occupation et (2) de maximiser la capacité de production d'énergie renouvelable du site (3) tout en usant de moyens dont l'impact énergétique propre tend vers zéro. »

Ces mêmes auteurs font remarquer que l'ambition des NZEB est détachée du projet : « La recherche d'un niveau « zéro-énergie » reflète une approche sectorielle de l'impact énergétique des bâtiments. Cette ambition peut être acceptée en tant que projection à l'échelle du secteur d'un équilibre énergétique global de nos sociétés, mais rien n'indique que l'équilibre annuel entre production et consommation soit pertinent à l'échelle d'un projet d'architecture. Au contraire, le niveau « net zéro-énergie » génère une iniquité flagrante au niveau du projet individuel, notamment entre les sites bénéficiant d'un fort potentiel d'énergies renouvelables et les autres, ou entre les projets permettant une réduction drastique des besoins et ceux qui ne le peuvent du fait de contraintes propres et justifiées (pensons aux questions de patrimoine remarquable, de capacité d'investissement, etc.). Un niveau d'ambition unique ne peut pas être considéré a priori comme applicable partout. Certaines situations de projet nécessiteront de revoir les ambitions à la baisse face aux contraintes techniques, économiques ou patrimoniales,

*tandis que d'autres permettrons d'aller plus loin que l'équilibre énergétique. »*

Van Moeseke et al. (2012) proposent donc de dépasser la notion de NZEB. Ils présentent une définition de la performance énergétique qui suggère de renoncer à la recherche d'équilibre entre consommation et production d'énergie renouvelable. Car ces deux aspects relèvent en effet de logiques différentes et de décisions distinctes. Ils pointent également le caractère inéquitable à l'échelle d'un projet d'une approche voulant équilibrer ou même comparer ces deux valeurs. Selon leur vision, il ne faut pas chercher à équilibrer des impacts négatifs (consommation) et positifs (production), mais chercher à minimiser les uns et à maximiser les autres. Il est important que l'évaluation juste de ces efforts se fasse relativement au potentiel du site et aux spécificités du programme, et non en valeur absolue.

Face au flou qui encadre la notion de « zéro-énergie » à l'échelle du bâtiment et à des échelles plus larges, il semble important de garder un regard critique face aux différentes possibilités de définition et aux différents objectifs d'équilibre. La Figure 5 suivante présente, à titre illustratif, une des « aberrations » auxquelles certaines définitions du « zéro-énergie » peuvent mener. A droite, un bâtiment correspondant à la définition du « zéro-énergie », du fait que son bilan est nul (sa production = sa consommation). A gauche, le même bâtiment mais comportant un étage d'habitation supplémentaire (et donc des besoins et des consommations de chauffage annuels plus importants), celui-ci pourrait par conséquent être considéré comme plus « durable » malgré le fait qu'il ne réponde plus strictement à la définition du « zéro-énergie » puisqu'il n'arrive plus à compenser par sa production locale l'intégralité de ses consommations. De là, on peut questionner ce standard « zéro-énergie » et la notion d'équilibrage des consommations (ou demandes) et considérer qu'outre le respect strict d'un objectif « zéro-énergie », l'enjeu est plus global et vise surtout à diminuer au minimum l'ensemble des consommations en énergie primaire et à augmenter au maximum la production d'énergie in-situ, selon le contexte et les potentialités de chaque bâtiment et de chaque contexte? Ce type de réflexion mène aussi à investiguer la possibilité, à l'échelle d'un îlot, d'un quartier ou d'une ville, de réutiliser le surplus d'énergie produit par certains types de bâtiments dans d'autres bâtiments bénéficiant de potentialités moins avantageuses en termes de localisation et de production locale d'énergies renouvelables. Cette « mutualisation énergétique », telle qu'introduite par Marique et al. (2013c) pourrait également être envisagée entre bâtiments présentant des fonctions différentes (récupération du surplus de chaleur d'immeubles de bureaux pour alimenter des logements, etc.) et sera investiguée dans la suite de SOLEN.

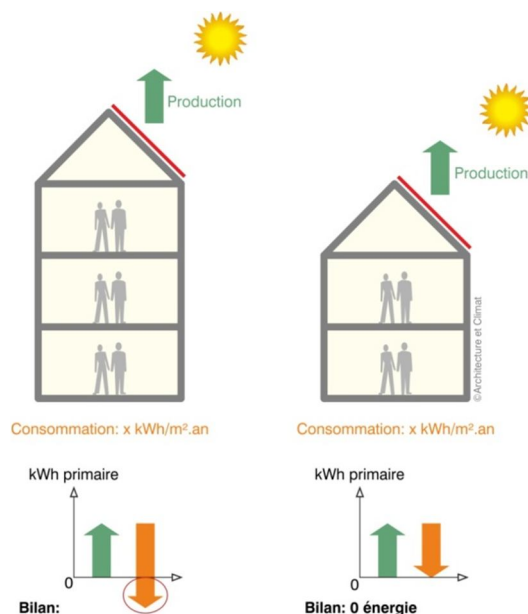


Figure 5: Illustration d'une réflexion sur le « zéro-énergie » pour deux bâtiments. Celui de gauche présente un bilan annuel « zéro-énergie », alors que celui de droite, qui présente un étage supplémentaire pour la même production d'énergie ne le respecte plus mais participe notamment à une meilleure utilisation des sols, en particulier en milieu urbain (Flémal, Architecture et climat, 2012).

#### 2.2.4.3. Des exemples concrets rencontrant l'objectif « zéro-énergie »

##### De nombreux recueils et publications relatifs aux « bâtiments zéro-énergie »

L'agence internationale de l'énergie (IEA, 2013) a dressé un recueil de « zero-energy buildings » réalisé à travers le monde. Il existe de nombreux autres exemples dans la littérature que nous ne développerons pas ici. Le lecteur intéressé trouvera de plus amples informations concernant ces bâtiments « zéro-énergie » dans les quelques références suivantes :

- The BOLIG+ project, <http://www.boligplus.org/> (in Danish) (accessed 19.11.10).
- V. Åkarp, <http://greenlineblog.com/2009/02/villa-karp-a-positive-net-energyhouse-in-malm-sweden/> (accessed 19.11.10).
- M. Noguchi, A. Athienitis, V. Delisle, J. Ayoub, B. Berneche, Net Zero Energy Homes of the Future: A Case Study of the ÉcoTerraTM House in Canada, in: Renewable Energy Congress, Glasgow, Scotland, July, 2008.
- The Active House project, <http://www.activehouse.info/> (accessed 19.11.10).
- M. Heinze, K. Voss, Goal zero energy building – exemplary experience based on the solar estate Solarsiedlung Freiburg am Schlierberg, Germany, Journal of Green Building 4 (4) (2009).
- E. Musall, T. Weiss, A. Lenoir, K. Voss, F. Garde, M. Donn, Net Zero Energy Solar Buildings: An Overview and Analysis on Worldwide Building Projects, in: EuroSun Conference 2010, Graz, Austria, 2010 (under review).
- K. Voss, E. Musall, Net Zero Energy Buildings – International Projects on Carbon Neutrality in Buildings, DETAIL, ISBN-978-3-0346-0780-3, Munich, 2011.

Une étude de cas détaillée (Attia, 2010)

**!!!! Ce paragraphe est intégralement issu de : Attia, S. G. M. (2010). "Aiming Zero Impact Buildings: Mondo Solar-2002, A case study in Belgium." Sustainable Buildings CIB 1. et a été traduit par Tatiana de Meester (Architecture et climat)!!!!**

Le projet de rénovation Solar-2002 zéro impact a été réalisé en Belgique. Les caractéristiques de la conception du bâtiment ont été établies sur les principes de base de l'architecture bioclimatique : profiter des ressources naturelles (soleil, pluie, etc.). Ce bâtiment situé à Berlaar, a été rénové en vue d'atteindre des principes de confort des occupants, d'efficacité énergétique, de production d'énergies renouvelables, de conservation des ressources et de réduction des impacts environnementaux. La maison atteint un bilan énergétique et de carbone neutre, un cycle de l'eau fermé, et presque un cycle « cradle to cradle » pour les matériaux de construction. Notons qu'il ressort de cette expérience qu'à l'heure actuelle, atteindre l'objectif « zero impact environnemental » n'est économiquement pas faisable sans des subventions du gouvernement fédéral et régional.



*Figure 6 : Le projet Solar 2002*

Cette maison a été largement monitorée : plus de 52 points de mesure ont été utilisés entre 2006 et 2009 pour le rayonnement solaire, les capteurs solaires, les températures, l'humidité, la qualité de l'eau, le stockage de l'eau, les émissions de CO<sub>2</sub>, la consommation d'électricité, les pompes à chaleur et la production de PV. Cependant, les résultats du monitoring montrent une difficulté à maintenir le confort thermique durant les périodes extrêmes de l'été ou de l'hiver.

Le concept de la maison Solar-2002 est une maison individuelle de deux étages : rez-de-chaussée de 100 m<sup>2</sup>, réduit à 90m<sup>2</sup> au premier étage. Le living et les chambres sont situés au rez-de-chaussée et les espaces de travail au premier étage (voir plans ci-dessous). La façade sud a le plus d'ouvertures ce qui permet un chauffage solaire passif. Pendant la saison estivale, l'orientation des fenêtres permet une ventilation transversale pour le refroidissement afin d'éviter des périodes de surchauffe.

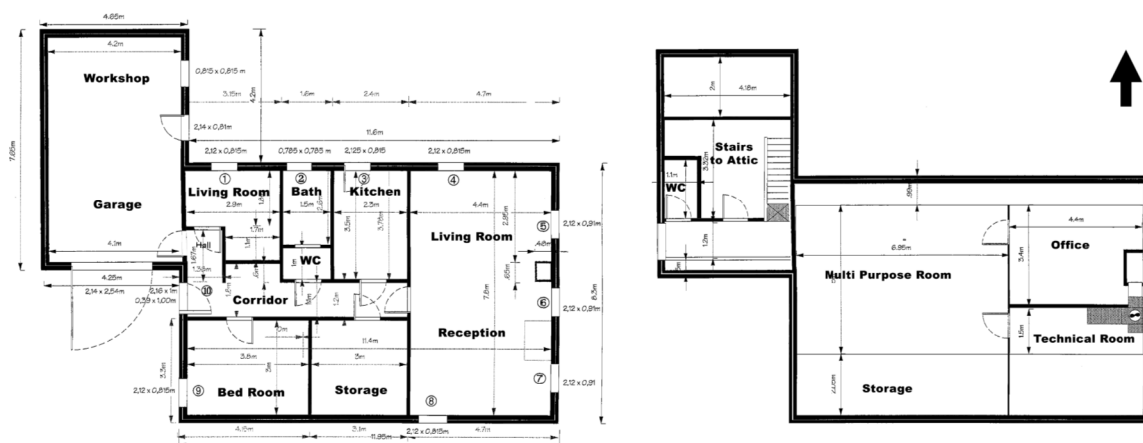


Figure 7 : Plan du rez-de-chaussée et du premier étage

L'enveloppe du bâtiment suit les principes de la maison passive. La composition des parois est constituée de maçonnerie de briques, d'un vide, de panneaux de particules, de 11 centimètres de laine minérale et de gypse. Le toit est un panneau de fibres de bois bitumé avec 23 cm d'isolation en cellulose, d'un creux et de gypse. Le processus de rénovation est basé sur une isolation par l'intérieur. Les propriétés de l'enveloppe sont décrites dans le tableau ci-dessous. L'étanchéité à l'air atteint 0,6 ACH à 50Pa. Un système de ventilation avec récupération de chaleur a été installé. Notons que le toit crée de par sa géométrie, un ombrage saisonnier, de sorte que les fenêtres au sud sont à l'ombre en été. Malgré cela, des volets extérieurs sont installés sur les fenêtres en façades sud et ouest.

Tableau 1 : Détails de construction de Solar-2002 et caractéristiques des installations

Building Description	Solar 2002	Solar Systems	Solar 2002
Shape	Rectangular ( 12 m x 8 m)	Azimuth	0°
Heated Volume	390 m <sup>3</sup>	Avg. sunshine (Horizontal)	2,55 kWh/m <sup>2</sup> .day
Wall area, Floor area	120 m <sup>2</sup> , 168 m <sup>2</sup>	TSAC Tilt	60°
Glazing Fraction	S: 21%; E: 4%; W:11%; N 4%	TSAC Area	36m <sup>2</sup>
Windows U-Value	0.5 W/m <sup>2</sup> K (DG)	PV/Thermal Tilt	30°
Exterior Wall U-Value	0.10-0.35 W/m <sup>2</sup> K	PV/Thermal Area	36m <sup>2</sup>
Roof U-value	0.16 W/m <sup>2</sup> K	Heat Pipe Tilt	60°
Floor U-value	0.25 W/m <sup>2</sup> K	Heat Pipe Area	2m <sup>2</sup>
Global U-value	0.53 W/m <sup>2</sup> K	PV yield (average)	4500 kWh, 4.5 kp

Les pentes du toit sont largement utilisées pour la production hybride d'énergie solaire thermique et d'électricité. Le versant sud du toit est entièrement utilisé pour le chauffage des locaux, le chauffage de l'eau et pour l'électricité. Pour le chauffage de l'espace, deux systèmes alimentent un réservoir central de stockage thermique de 850 litres (SOLUS II) : premièrement, 36 m<sup>2</sup> de panneaux solaire thermique (TSAC) et d'autre part une pompe à chaleur géothermique eau-eau. La pompe à chaleur avec serpentin (6kWth et 1,3 kWe) bénéficie d'un réservoir d'eau souterrain, où la chaleur générée au cours de l'été est

utilisée pour chauffer le sol alors que, pendant l'hiver, le flux de chaleur est utilisé pour chauffer le bâtiment. L'eau chaude accumulée dans le réservoir est utilisée dans les radiateurs et les planchers chauffants (voir Figure ci-dessous). Pour l'eau chaude sanitaire (ECS), un panneau solaire thermique de 2m<sup>2</sup> alimente un boiler de 150 litres. Pour la production d'électricité, un système PV/thermique de 36 m<sup>2</sup> produit une puissance maximale de 5kW. La chaleur produite en dessous des panneaux photovoltaïques sur le toit est récupérée et distribuée via un ventilateur (Figure ci-dessous). Il faut noter ici que, en raison du caractère expérimental du projet et afin d'atteindre une autonomie énergétique, la maison comprend de nombreuses installations techniques hybrides et complexes.

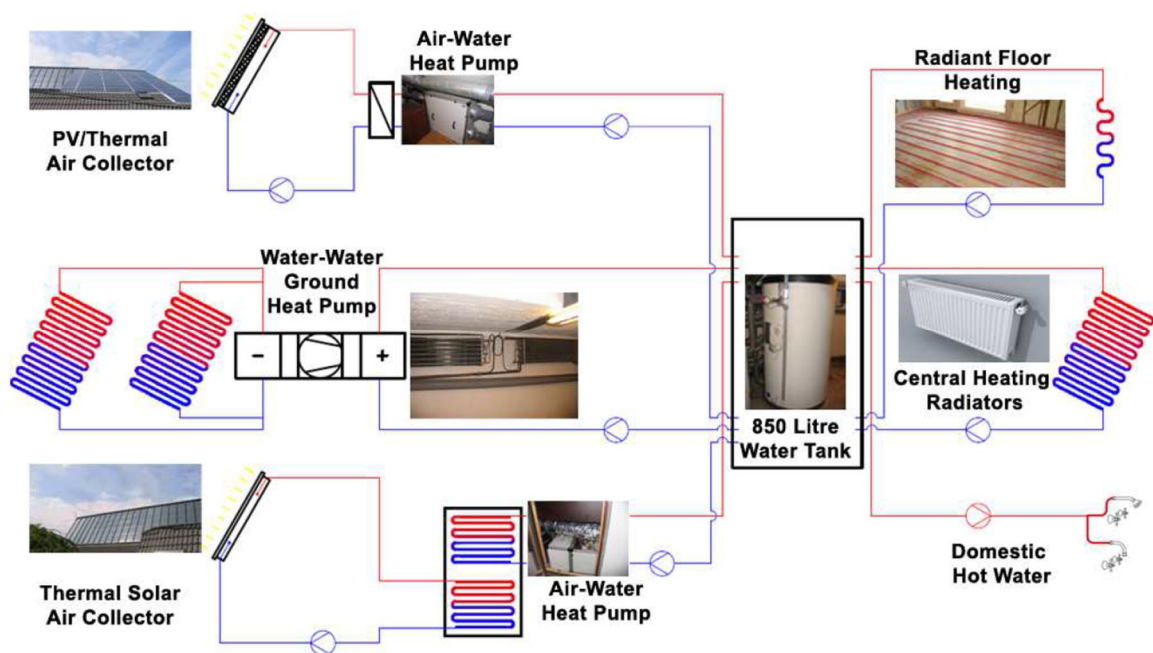


Figure 8 : Schéma pour les installations du système actif

En ce qui concerne le traitement de l'eau, à Berlaar, la pluviométrie moyenne annuelle est de 780 mm. Cela signifie que le volume moyen annuel des précipitations est au-delà de la nécessité des occupants (78 000 litres). La maison possède deux cycles de l'eau. Le premier cycle de l'eau récupère les eaux du toit dans un réservoir d'eau central. Le réservoir alimente les douches et les toilettes et en même temps, un certain volume d'eau est filtré pour devenir de l'eau potable. Le second cycle de l'eau traite les eaux usées. Celles-ci passent par trois réservoirs successifs, de 1 200 litres chacun, avec des systèmes de filtration. L'eau filtrée finale est traitée afin de générer d'une part des déchets solides et de l'autre de l'eau claire. L'eau alimente un lac bio-nettoyeur et les déchets solides seront mélangés pour retourner dans le sol.

Les consommations énergétiques de la maison Solar-2002 ont pu être analysées grâce à un système de monitoring. La figure suivante illustre et compare les consommations avant et après rénovation.



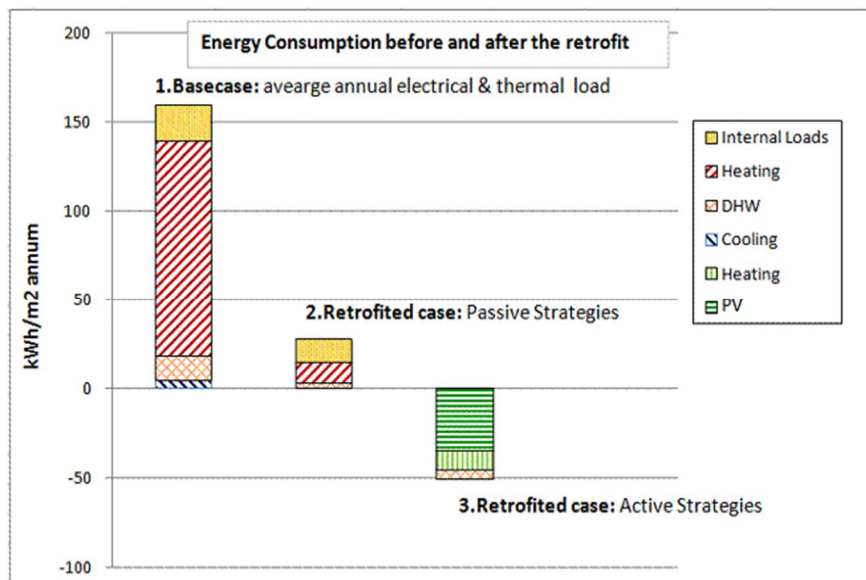


Figure 9 : Consommations énergétiques avant et après rénovation

La maison ne produit pas de CO<sub>2</sub> et aucun processus de combustion n'est associé à l'utilisation quotidienne du bâtiment. En considérant la consommation énergétique, Solar-2002 est dépendant énergétiquement sur une base annuelle. Pour calculer la neutralité énergétique, l'étude a adopté la définition des « Net Zero Energy Buildings (NZEBs) » de l'Agence internationale de l'énergie (AIE). La définition de l'AIE précise qu'un NZEB est connecté à un réseau et que c'est un bâtiment performant énergétiquement, ce qui doit lui permettre d'équilibrer ses besoins énergétiques annuellement grâce à une production in-situ. En effet, la maison bénéficie d'un ensoleillement toute l'année ce qui lui permet d'alimenter le réseau avec ses surplus de production. L'énergie thermique et électrique produite au cours de la saison ensoleillée crée suffisamment de puissance pour équilibrer la consommation d'énergie sur une base annuelle. Les résultats du monitoring montrent que les stratégies passives permettent d'économiser annuellement 90 GJ, soit 79% d'énergie primaire consommée par rapport à une maison typique de référence. Aussi la maison économise en moyenne 4 tonnes, soit 68% des émissions annuelles de CO<sub>2</sub>. Le calcul du cycle de vie prouve que le bâtiment permettra d'économiser jusqu'à 200-240 tonnes d'émissions de CO<sub>2</sub> sur une période de 50 ans, en excluant l'énergie grise, et en le comparant avec une maison similaire, utilisant un chauffage au gaz naturel consommant 23 000 kWh en moyenne par an.

La maison est totalement indépendante en eau et peut donc rester non connectée aux circuits.

Le processus de rénovation a utilisé des matériaux écologiques à faible énergie grise. Les matériaux utilisés sont biodégradables et peuvent être facilement produit par la nature. Le cycle de vie des matériaux a été calculé pour 100 années.

Les résultats du monitoring montrent que le confort thermique n'est pas garanti dans tous



les espaces de la maison. Au rez-de-chaussée, il n'était pas possible de garantir une température confortable. Pendant l'hiver, il a été difficile de maintenir les 20 °C et pendant l'été, les températures ont souvent dépassé les 25°C. Notons également que la qualité de l'air à l'intérieur du bâtiment (IAQ) n'a pas été bien maintenue. Les températures enregistrées, les ratios d'humidité et les niveaux de CO<sub>2</sub> étaient élevés.

En conclusions, la maison Solar-2002 a réussi à atteindre un équilibre pour être neutre sur plusieurs aspects : énergie et carbone, cycle fermé de l'eau et presque un cycle cradle to cradle pour les matériaux de construction. Toutefois, l'étude a révélé d'autres aspects importants qui doivent être considérés dans la réalisation de bâtiments « zéro-énergie ».

Malgré la satisfaction des occupants pour le confort thermique, le bâtiment ne peut pas garantir de bonnes conditions de confort thermique, à la fois en hiver et en été, selon la définition du confort thermique belge.

Un autre aspect qui requiert une attention particulière, est le stockage de l'énergie et la connexion au réseau. L'analyse de la maison a souligné l'importance du stockage thermique. La chaleur est stockée sur une base quotidienne en utilisant le réservoir de stockage thermique ou sur une base saisonnière en utilisant le sol. Cependant, ce stockage de chaleur thermique ne satisfait pas les exigences des demandes de chaleur du bâtiment. D'un autre côté, sans être connecté au réseau électrique, le bâtiment ne pourrait pas être énergétiquement neutre. Les conséquences de la dépendance au réseau et l'influence des PV sur le réseau sont des questions importantes pour atteindre des bâtiments « zéro-énergie ». Solar-2002 ne pourrait pas être « carbone zéro » sans l'utilisation de technologies très complexes. Ce projet a pu être réalisé uniquement grâce à l'aide financière et des subventions accordées par le gouvernement régional et la province.

#### Très peu de « quartiers zéro-énergie »

A l'échelle du quartier, on remarquera deux cas : le quartier « Plus-Energie » de Freiburg, en Allemagne, qui produit plus d'énergie qu'il n'en consomme grâce à une conception réfléchie du plan masse et des bâtiments et la mise en œuvre de systèmes énergétiques optimisés et renouvelables et le quartier BEDZED à Sutton (Angleterre) dont l'ambition initiale était de développer un quartier dont le bilan-carbone soit égal à zéro (impact neutre) sans utilisation d'énergies fossiles. Plus largement, de nombreux quartiers, dit « quartiers durables » ou « écoquartiers » ont vu le jour dans divers régions d'Europe. Si les aspects énergétiques sont souvent traités, la plupart de ces quartiers n'envisagent pas comme objectifs d'atteindre un bilan « zéro-énergie » (voir notamment Marique et Reiter, 2011 pour une analyse de quelques quartiers précurseurs en Europe).

#### **2.2.5. Du bâtiment au quartier, car la forme urbaine et la mobilité ont un impact !**

Comme la section précédente l'a mis en évidence, en ce qui concerne les réalisations concrètes « zéro-énergie », les travaux scientifiques relatifs à une échelle plus large que celle du bâtiment individuel restent également très peu nombreux. On remarquera Kennedy et Sgouridis (2011) et Todorovic (2012) qui traitent respectivement de la question de la définition d'une « Ville Zéro-Carbone » et du rôle des outils de simulation de la performance des bâtiments dans la planification de « Villes zéro-énergie ». D'une façon

générale, les études et recherches relatives aux performances énergétiques des bâtiments restent ainsi, pour la plupart, concentrées sur l'échelle du bâtiment individuel même si plusieurs auteurs (Baker et Steemers, 2000 ; Steemers, 2003 ; Ewing et Rong, 2008 ; Ratti et al., 2005) ont mis en évidence l'influence de la forme urbaine sur les consommations d'énergie dans le secteur du bâtiment et l'intérêt de dépasser l'échelle du bâtiment individuel pour traiter cette question.

En matière de potentiel en énergies renouvelables à une échelle plus large que celle du bâtiment individuel, des études sont apparues sur le potentiel solaire de zones urbaines existantes dans une optique d'implantation de panneaux solaires photovoltaïques (Amado et Poggi, 2012 ; Izquierdo et al., 2008) mais ces études ne croisent pas leurs résultats avec les consommations énergétiques des bâtiments ni avec le potentiel énergétique provenant d'autres types d'énergies renouvelables. Le concept de « mutualisation énergétique » à l'échelle du quartier est quasi inexistant dans la littérature actuelle. Remarquons un article de Nielsen et Möller (2012) qui montre que la surproduction de chaleur provenant de panneaux solaires thermiques sur des « Bâtiments Zéro-Energie » peut être réutilisée à travers un réseau de chaleur urbain et ainsi augmenter la part d'énergie renouvelable qui alimente ce type d'infrastructure.

Considéré seul, l'impact de la forme urbaine sur les choix modaux et les consommations d'énergie dues aux déplacements des personnes (domicile-travail, en particulier) a fait l'objet, depuis les travaux fondateurs de Newman et Kenworthy (1989), d'un corps relativement important de littérature. Ces travaux (Naess et al. 1996 ; Banister et al. 1997 ; Marique et al, 2013b) ont montré que l'impact de la forme urbaine (même s'il se limite le plus souvent à la seule prise en compte de la densité bâtie) sur les consommations énergétiques dues au transport est réel et significatif.

Les études qui se sont attachées à prendre en compte conjointement les secteurs du bâtiment et du transport sont très peu nombreuses. Steadman (1979) est le premier à avoir développé un point de vue théorique sur l'aménagement urbain qui aborde des critères de forme et de densité. Il arrive à la conclusion que les villes denses diminuent la part d'énergie consommée due au transport mais augmentent l'énergie consommée à l'intérieur des bâtiments et limitent le potentiel en énergies renouvelables solaires. Il montre ainsi l'intérêt d'aborder ces différents domaines conjointement. Sur base de modèles simplifiés, d'autres auteurs (Steemers, 2003 ; Ratti et al., 2005 ; Holden et Norland 2005 ; Norman et al., 2006 ; Marique et Reiter 2012b) ont aussi étudié certaines interrelations entre consommations d'énergie dans le bâtiment et pour le transport, et confirmé l'intérêt de cette approche combinée. L'interaction entre bâtiment et mobilité, bien que cruciale au regard aux questions abordées dans les objectifs de la recherche, reste traitée de façon fragmentaire dans la littérature scientifique, comme d'ailleurs dans les actions concrètes ou orientations stratégiques politiques qui négligent le plus souvent l'impact de la localisation sur la génération de mobilité pour se concentrer sur les performances énergétiques du bâtiment individuel (neuf le plus souvent).

Ces concepts ne sont pour autant pas définis de façon précise et univoque. Un état de l'art relatif à ces concepts est présenté dans les trois sections suivantes

Les concepts de « Quartier (très) basse énergie », « Quartier passif » et « Quartier Zéro-Energie » (Zero-Energy Neighbourhood) sont donc très novateurs et seulement mobilisés de façon très ponctuelle dans quelques expériences pilotes de « démonstration » (voir section précédente) mais ne font actuellement l'objet d'aucun cadre théorique établi. Dépasser l'échelle du bâtiment individuel est pourtant crucial au vu des interactions qui s'opèrent à une échelle plus large, tant sur les performances du bâtiment individuel que sur le potentiel en énergies renouvelables. De plus, dans une optique globale de durabilité, ces concepts de « Quartier (très) basse énergie », « Quartier passif » et « Quartier Zéro-Energie » ne peuvent être dissociés de l'impact de la localisation des quartiers et des activités sur le territoire sur la génération de mobilité et les consommations énergétiques liées aux déplacements quotidiens.

Les concepts de « Quartier Basse-Energie » (QBE), « Quartier Passif » (QPA) et « Quartier Zéro-Energie » (QZE) introduit dans le cadre de la recherche SOLEN sont définis en première approche dans la section suivante.

## **2.2.6. Synthèse et définition dans le cadre de SOLEN**

### **2.2.6.1. Orientations adoptées dans le cadre du développement de l'outil SOLEN, par rapport aux objectifs « passif », « (très) basse énergie » et « zéro-énergie ».**

Pour rappel, outre l'aspect scientifique de la recherche (qui est/sera valorisé via de nombreuses publications scientifiques), l'objectif concret de la recherche SOLEN est d'offrir un outil informatique interactif, accessible sur le Web, qui permette de déterminer, pour une combinaison donnée de critères (type de quartier (urbain, périurbain, rural), densité, caractéristiques et âge du bâti, éloignement au centre-ville, mixité, etc.) des stratégies de rénovations énergétiques les plus efficaces, tant en ce qui concerne la rénovation des bâtiments, que la mobilité des habitants et le recours aux énergies renouvelables, en vue d'améliorer la performance énergétique de ces tissus et de réduire les émissions de gaz à effet de serre à l'échelle des quartiers.

Cet outil comprendra également :

- Des indicateurs d'évaluation de l'efficacité énergétique des quartiers wallons (urbains, périurbains et ruraux);
- Des développements méthodologiques et techniques pour améliorer l'efficacité énergétique des quartiers existants selon trois axes : bâtiments, mobilité et énergies renouvelables;

Cet outil a pour ambition principale de sensibiliser le grand public et les autorités aux questions énergétiques dans le bâtiment et le transport ainsi que de participer à encourager et faciliter la mise en œuvre de projets de rénovations énergétiques de bâtiments et de quartiers wallons visant notamment les performances « (très) basse énergie », « passif » voire « zéro-énergie ». Le projet SOLEN vise essentiellement le bâti existant qui est peu performant énergétiquement, d'une façon générale. Les objectifs «

(très) basse énergie », « passif » voire « zéro-énergie » seront donc proposés, dans l'outil interactif, mais pas imposés. Des niveaux de rénovation intermédiaires (isolation de la toiture, remplacement des vitrages, rénovation au standard PEB pour les nouvelles constructions, etc.), déjà mobilisés dans le cadre de l'outil SAFE ([www.safe-energie.be](http://www.safe-energie.be)) seront maintenus dans l'outil SOLEN de façon à proposer aux propriétaires un large panel de solutions, adaptées à différents types de budget et d'objectifs.

#### 2.2.6.2. Les définitions adoptées dans le cadre de l'outil interactif SOLEN

En première approche, les définitions suivantes sont adoptées, dans le cadre de l'outil interactif SOLEN. Elles seront soumises à précisions et éventuellement adaptations dans la suite de la recherche de façon à définir, notamment pour les définitions relatives au quartier, les limites du système considéré, les postes énergétiques considérés, la période de temps de référence, etc. :

- Dans une rénovation « basse énergie », le besoin net d'énergie de chauffage est inférieur ou égal à 60 kWh/m<sup>2</sup>.an, dans les conditions de calculs respectant le PHPP 2007 et à adapter à la PEB (éventuellement avec un Espec max). Le taux de perméabilité à l'air  $\eta_{50}$  est inférieur ou égal à 2 h<sup>-1</sup> (ce qui correspond à  $\eta=0.1$  [h<sup>-1</sup>]).
- Dans une rénovation « très basse énergie », le besoin net d'énergie de chauffage est inférieur ou égal à 30 kWh/m<sup>2</sup>, dans les conditions de calculs respectant le PHPP 2007 et à adapter à la PEB (éventuellement avec un Espec max). Le taux de perméabilité à l'air  $\eta_{50}$  est inférieur ou égal à 1 h<sup>-1</sup> (ce qui correspond à  $\eta=0.05$  [h<sup>-1</sup>]). Cette hypothèse d'étanchéité répond aux conseils du CSTC en matière d'efficacité de la récupération de chaleur sur un système de ventilation double flux.
- Dans une rénovation passive, la modélisation de bâtiment passif dans le projet SOLEN prendra en compte la définition et le calcul du logiciel PHPP.
- Dans un bâtiment « zéro-énergie », la consommation en énergie primaire (Espec) est diminuée au maximum selon le calcul de la PEB (Chaud, froid, ventilation, auxiliaires, ECS, etc.) et la production d'énergies renouvelables in-situ est développée au maximum jusqu'à compenser, au minimum, la totalité des consommations en énergie primaire dues au fonctionnement du bâtiment et à ses occupants, sur base annuelle.
- Un « Quartier Basse-Energie » est un quartier où le bilan annuel global entre les consommations, en énergie primaire, relatives aux bâtiments et aux déplacements des personnes, d'une part, et la production d'énergies renouvelables, d'autre part, est inférieur à 60 kWh/m<sup>2</sup>.an.
- Un « Quartier Passif » est un quartier où le bilan annuel global entre les consommations, en énergie primaire, relatives aux bâtiments et aux déplacements des personnes, d'une part, et la production d'énergies renouvelables, d'autre part, est inférieur à 15 kWh/m<sup>2</sup>.an.
- Un « Quartier Zéro-Energie » est un quartier où les consommations annuelles, en énergie primaire, relatives aux bâtiments et aux déplacements quotidiens des personnes sont entièrement compensées par la production annuelle locale

d'énergie grâce à des sources renouvelables. La consommation moyenne en énergie primaire (Espec) des bâtiments du quartier est diminuée au maximum selon le calcul de la PEB. Les consommations liées au transport (due à la localisation du quartier) sont également minimisées. Le potentiel de production d'énergie du quartier est développé au maximum jusqu'à compenser, au minimum, la totalité des consommations en énergie primaire dues au fonctionnement et à l'utilisation des bâtiments et au transport quotidien des personnes.

Les définitions présentées ci-dessus impliquent l'évaluation de nombreux paramètres dont la consommation caractéristique annuelle d'énergie primaire. Il s'agit de la consommation annuelle d'énergie primaire pour le chauffage des locaux, la production d'eau chaude sanitaire, le refroidissement (fictif), les auxiliaires, calculés selon la méthode décrite dans l'annexe I de la PEB.

Le tableau suivant reprend, regroupé en 5 thématiques, l'ensemble des paramètres dont une valeur devrait être calculée lors de l'évaluation du, des bâtiments ou du quartier dans l'outil interactif SOLEN. Les trois premières thématiques (A. Consommations relatives au(x) bâtiment(s) et à son utilisation, B. Production d'énergies renouvelables et C. Déplacements quotidiens des occupants) sont indispensables au bilan énergétique global. Les différents postes à évaluer doivent faire l'objet d'une évaluation annuelle et mensuelle et les consommations / productions seront transformées en énergie primaire de façon à pouvoir comparer les différents postes. Les thématiques D (Energie grise) et E (émissions de gaz à effet de serre) complètent l'analyse mais restent facultatives. L'unité utilisée dans ce bilan est le kWh (annuel et mensuel). L'utilisation d'autres indicateurs (kWh/m².an, kWh/personne.an, coût annuel, etc.) est souhaitée pour compléter et enrichir l'analyse et pour l'adapter aux besoins et aux priorités de chaque utilisateur.

*Tableau 2 : Premier cadre général proposé pour l'évaluation des résultats globaux, suite à une évaluation d'un bâtiment ou d'un groupe de bâtiments dans l'outil interactif SOLEN.*

<b>A. Les consommations relatives au(x) bâtiment(s) et à son utilisation</b>	
<b>POSTES CONSIDERES</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Chauffage et ventilation</li> <li>- Refroidissement</li> <li>- Eau chaude sanitaire</li> <li>- Auxiliaires</li> <li>- Cuisson</li> <li>- Electroménagers</li> <li>- Eclairage</li> <li>- Autres</li> </ul>	
<b>INDICATEURS A CALCULER</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Niveau K</li> <li>- Risque de surchauffe</li> <li>- Espec [kWh/m².an]</li> <li>- Niveau E</li> </ul>	
<b>BILAN A. (ENERGIE PRIMAIRE, BALANCES ANNUELLE ET MENSUELLE)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Total des consommations par type de combustibles</li> <li>- Total des consommations d'électricité</li> </ul>	<b>CONSOMMATIONS A MINIMISER</b>

- Autres.	
<b>B. La production d'énergies renouvelables</b>	
POSTES CONSIDERES - Panneaux solaires thermiques - Panneaux photovoltaïques - Eoliennes (quartier ou individuelle) - Biomasse - Autres	
<b>BILAN B. (ENERGIE PRIMAIRE, BALANCES ANNUELLE ET MENSUELLE)</b>  -Production de chaleur provenant des sources renouvelables -Production d'électricité provenant des sources renouvelables -Autres	<b>PRODUCTION A MAXIMISER</b>
<b>C. Les déplacements quotidiens des occupants</b>	
POSTES CONSIDERES -Déplacements quotidiens des occupants pour le travail, l'école, les commerces, etc. que ce soit en voiture, en co-voiturage, en bus, en train, à vélo, à pied, etc.	
<b>BILAN C. (ENERGIE PRIMAIRE, BALANCES ANNUELLE ET MENSUELLE)</b>  -Consommation de carburant pour les déplacements -Consommation d'électricité pour les déplacements -Autres	<b>A MINIMISER</b>
<b>D. (((L'énergie grise))))</b>	
(((Energie grise du bâtiment)) <i>(énergie primaire pour production, utilisation et évacuation d'un matériau, depuis extraction des matières premières jusqu'au traitement en fin de vie + énergie nécessaire au transport jusqu'au chantier et à la mise en œuvre)</i>	<b>A MINIMISER</b>
(((Energie grise du quartier)) <i>(la voirie, ses trottoirs, son éclairage, tous les réseaux, électriques, d'égouts, d'eau, de gaz, de télécommunications,...)</i>	<b>A MINIMISER</b>
<b>E. (((Les émissions de gaz à effet de serre))))</b>	
(((Emissions: CO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , GES, de poussière, etc.)))	<b>A MINIMISER</b>
<b>BILAN GLOBAL A, B, C, (D), (E)</b>	
Bilan global des différents postes calculés, sur base annuelle et sur base mensuelle, en énergie primaire, et éventuellement sur base d'autres indicateurs à spécifier par l'utilisateur > l'objectif « zéro-énergie » est-il rempli ?!	

### 2.2.6.3. Les approfondissements opérés dans la suite de la recherche SOLEN

Ces définitions restent pour l'instant théoriques et orientées vers l'outil interactif final à développer. Dans le cadre de la recherche SOLEN, elles feront l'objet d'analyses approfondies, notamment en ce qui concerne les éléments suivants :

- (1) la définition précise et complète d'un cadre conceptuel solide qui s'articule autour des consommations énergétiques des bâtiments, de l'impact de la localisation sur les consommations pour le transport et du recours à des sources d'énergies renouvelables ;
- (2) le développement de méthodes d'évaluation complètes qui permettent, dans une approche systémique, de rendre compte de la complexité de l'objet « quartier » et des multiples interactions qui s'opèrent en son sein.
- (3) la définition complète des limites des systèmes considérés et des périodes de temps étudiées (bilans annuel, mensuels, etc.).
- (4) l'investigation des notions de « mutualisation énergétique », de stockage de l'énergie et de connections aux réseaux.

## 3.Phase I : Typologie

### 3.1. Introduction

L'approche typologique, aussi employée par Jones et al. (2000) ou Maizia et al. (2009), permet à la fois de dépasser l'approche monographique et non reproductible d'une analyse de cas et de permettre la généralisation des résultats obtenus à un territoire plus vaste sans adopter les hypothèses plus restrictives qui caractérisent souvent les analyses menées à l'échelle de l'ensemble du stock bâti d'une région (par exemple Dujardin et al. (2012) pour le stock bâti wallon ou Wallemacq et al. (2011) et Marique (2013) pour la région urbaine de Liège). Les typologies des quartiers et des bâtiments résidentiels wallons proposées dans les sections suivantes seront ultérieurement mobilisées dans l'outil interactif. Elles permettront notamment, via le choix d'images synthétiques, à l'utilisateur de spécifier dans quel type de quartier et dans quel type de bâtiment il réside de façon à adapter une série de paramètres relatifs à l'évaluation énergétique des quartiers, des bâtiments, des transports et des énergies renouvelables. Elles seront aussi mobilisées dans le cadre de la recherche, notamment en ce qui concerne l'identification et la quantification des pertes solaires engendrées par les obstructions dues aux masques environnants, l'investigation des interrelations entre forme urbaine, localisation et déplacements des personnes ainsi que dans le cadre des variations paramétriques destinées à identifier les paramètres qui ont le plus d'influence sur les bilans énergétiques globaux des quartiers et des bâtiments.

### 3.2. Typologie des quartiers wallons

Une typologie des quartiers résidentiels wallons a d'abord été réalisée de façon à identifier les configurations-types les plus courantes. L'angle d'approche adopté pour développer cette typologie est la densité bâtie (densité nette de logements par hectare urbanisé) qui a l'avantage d'axer le propos sur des caractéristiques morphologiques des quartiers. Une contrainte supplémentaire posée en préambule à la définition de cette typologie de quartiers et sa spatialisation, c'est-à-dire, qu'un lien entre les quartiers (selon leur densité) et leur localisation doit pouvoir être maintenus, notamment dans le cadre de l'investigation des interrelations entre forme urbaine, localisation et génération de mobilité.

L'analyse typologique a été réalisée sur base cartographique (fond de plan PLI (plan de localisation informatique<sup>3</sup>) de la Wallonie qui reprend les parcelles, les voiries et les bâtiments existants). La densité nette de logements dans chaque quartier (assimilée dans le cadre de ce calcul au secteur statistique qui est la plus petite entité statistique pour laquelle des données INS sont disponibles<sup>4</sup>) a été calculée sur base des données de l'INS

---

<sup>3</sup> Le plan de localisation informatique (PLI) de la Wallonie (1/10.000) qui vise à enrichir le fond de plan cadastral de l'IGN d'un référentiel cadastral continu sur l'ensemble du territoire wallon. Il comprend les communes, divisions, sections, parcelles et bâtiments issus des planches cadastrales vectorisées et recalées (en les déformant) sur les cartes topographiques de l'IGN. Une clé unique est attribuée à chaque parcelle et permet le lien avec la matrice cadastrale.

<sup>4</sup> « Le secteur statistique est l'unité territoriale de base qui résulte de la subdivision du territoire des communes et des anciennes communes par l'Institut National de la Statistique. L'objectif était de pouvoir diffuser les données



2001 (Enquête socio-économique générale 2001). Pour rappel, la densité nette de logements représente le nombre de logements par hectare urbanisé (les espaces collectifs, voiries, etc. sortent donc du calcul de la surface de référence). Conformément à l'objet de la recherche, seuls les bâtiments résidentiels sont considérés ici.

La répartition des secteurs statistiques selon la densité nette de logements par hectare s'exprime sous forme d'une courbe gaussienne. 10 classes de densité ont été utilisées pour classer les 9.875 secteurs statistiques wallons selon leur densité nette de logements (classification « natural breaks » de Jenks, qui détermine le meilleur arrangement des valeurs en classes par comparaison itérative des sommes de la différence au carré entre les valeurs observées au sein de chacune des classe et des moyennes de celles-ci. La « meilleure » classification identifie les « ruptures » dans la distribution des valeurs ordonnées ce qui minimise, sans tenir compte de la classe, la somme des différences au carré.).

Ces 10 classes de densité et leurs caractéristiques principales sont synthétisées dans le tableau suivant :

*Tableau 3 : Les dix classes de densité et leurs caractéristiques principales*

Classe	Densité nette de logements	Type d'habitat	Type de bâti	Type d'environnement
1	0 à 4,9	Individuel	Corps de fermes isolés	Rural
2	5 à 8,9	Individuel	Maisons isolées et mitoyennes	Rural
3	9 à 13,9	Individuel	Maisons isolées et mitoyennes	Rural à Périurbain
4	14 à 20,9	Mixte	Maisons isolées et mitoyennes	Périurbain et Centre-Bourg
5	21 à 31,9	Mixte	Maisons mitoyennes en ruban et petits immeubles	Périurbain et Centre-Bourg
6	32 à 48,9	Mixte	Maisons mitoyennes en ruban et petits immeubles	Périurbain à Urbain
7	49 à 78,9	Mixte	Maisons mitoyennes en ruban et ilots urbains	Urbain
8	79 à 137,9	Collectif bas	Maisons mitoyennes en ruban et ilots urbains	Urbain
9	138 à 255,9	Collectif Moyen	Ilots urbains	Urbain
10	256 à 507	Collectif haut	Ilots urbains	Urbain

statistiques à une échelle plus fine que celle de la commune. Les secteurs statistiques ont été définis en 1970 pour le Recensement de la Population et des Logements (recensement INS de 1981) sur base de caractéristiques d'ordre social, économique, urbanistique ou morphologique. Ils ont été retouchés pour l'Enquête Socio-Economique de 2001 pour épouser les modifications des limites communales et intégrer les grandes modifications de l'utilisation des sols. », [www.statbel.fgov.be/fr/](http://www.statbel.fgov.be/fr/), consulté en mars 2010. De façon générale, on considère, qu'en zone urbaine, le secteur statistique s'approche de la notion du « quartiers » et qu'en zones rurales, il reprend un ensemble de hameaux.

Ces 10 classes de densité ont ensuite été agrégées en 8 types de quartiers principaux, car certaines présentent, sur base d'une analyse visuelle, des similarités. C'est notamment le cas pour les classes de densité très élevée. On peut également remarquer, au sein d'une même classe de densité, la co-existence de deux ou plusieurs types morphologiques de quartiers différents (comme c'est le cas pour les quartiers de type « semi-continu homogène, cité sociale » et « village, noyau rural ». Aucune classe de densité n'est attribuée au dernier type, « grands ensembles et autres », car ce type de quartiers, peu fréquent en Wallonie, présente des spécificités morphologiques propres (bâtiments de grande hauteur, large espaces libres).

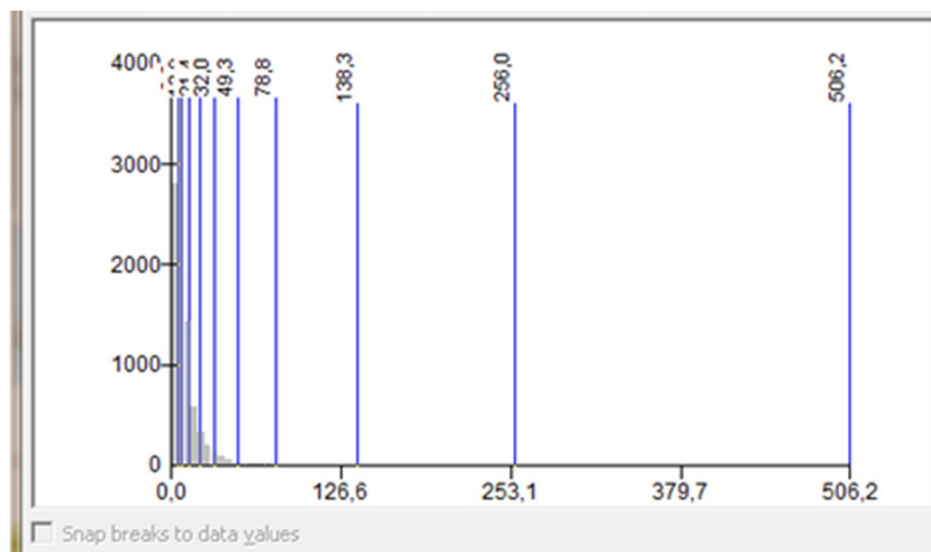


Figure 10 : Classification des secteurs statistiques par classe de densité nette de logements (natural breaks)

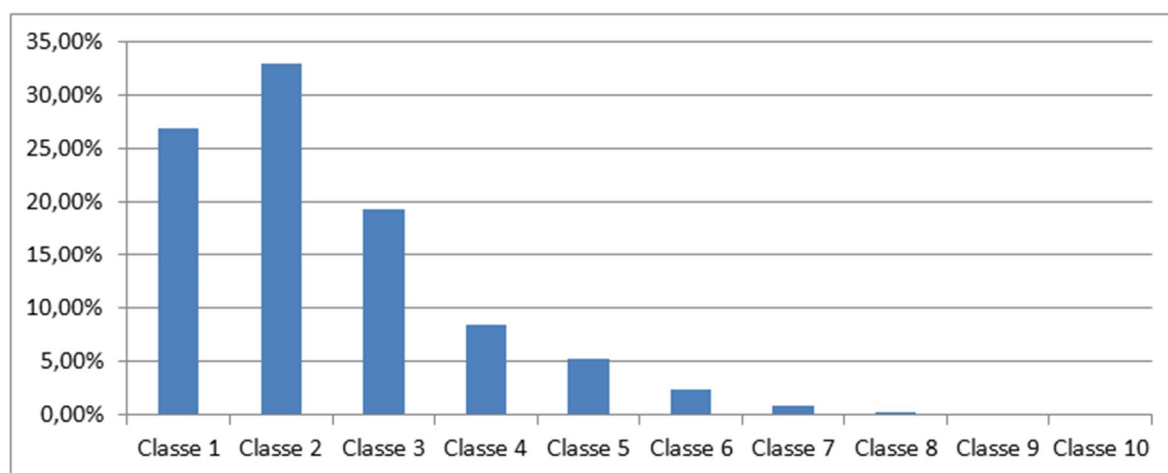


Figure 11 : Répartition des secteurs statistiques par classe de densité (%)

La typologie de quartiers finale est présentée dans le tableau suivant, où, à chacune des classes de densité adoptées, est attribué un nom caractérisant le quartier.

Tableau 4 : Typologie des quartiers résidentiels wallons selon la densité nette de logements

	Type de quartiers	Densité (log/ha)
1	Centre-ville dense	[79-138,9[, [139-255,9[, [257-507[
2	Urbain continu	[49-78,9[
3	Urbain semi-continu	[32-48,9[
4	Semi continu homogène, cité sociale	[14-20,9[, [21-31,9[
5	Village, noyau rural	[14-20,9[, [21-31,9[
6	Lotissement périurbain	[5-8,9[, [9-13,9[
7	Rural isolé	[0-4,9[
8	« Grands ensembles » & autres	-



Figure 12 : Exemple de classification des secteurs statistiques selon leur densité nette de logements, centre-ville de Liège

Un quartier représentatif de chaque type a ensuite été sélectionné sur base visuelle. Ces quartiers seront considérés comme les cas de référence mobilisés dans la suite de la recherche SOLEN. Les analyses qui seront réalisées dans la suite de la recherche seront ultérieurement reproduites pour d'autres quartiers représentatifs de chaque type de façon à tester la variabilité de certains paramètres au sein d'une même classe de densité.

Chacun de ces huit quartiers-types a ensuite fait l'objet d'une modélisation tridimensionnelle dans le logiciel Sketchup®. Les données nécessaires à ces modélisations proviennent du fond de plan cadastral PLI (Plan de Localisation Informatique, 1/10.000, version de 2006) de la Wallonie, du fond de plan PICC (Projet Informatique de Cartographie Continue<sup>5</sup>, 1/1.000) de la Wallonie, de données extraites sur Google StreetView™ et de données complémentaires recueillies sur site.

Les huit quartiers types de base sont présentés sur les figures suivantes. Remarquons que les quartiers de type 4, 5 et 6 sont issus de la typologie des quartiers réalisées dans le cadre du projet de recherches SAFE qui portait uniquement sur les quartiers périurbains.

	Type	Densité	Gabarit
1	Centre-ville dense	[79-507[	R+3 et plus



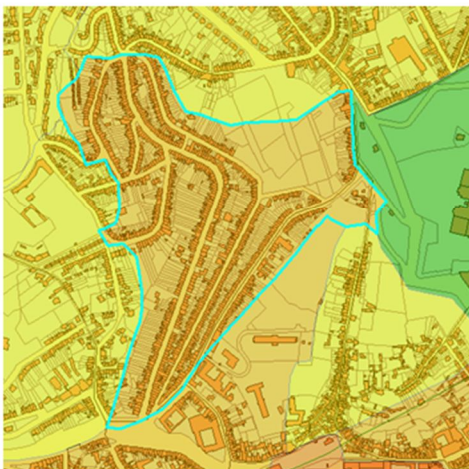
#### 1. Quartier Saint-Loup, Namur – 104 log/ha

*Figure 13 : Le quartier-type de type « centre-ville dense » : quartier Saint-Loup à Namur*

<sup>5</sup> Le PICC permet notamment d'extraire les données relatives à la troisième dimension (hauteur de faite et hauteur de corniche) mais n'est pas disponible sur l'ensemble du territoire wallon.



	Type	Densité	Gabarit
2	Urbain continu	[49-79[	R+2 à R+4



2. Quartier Fond-Pirette-Campine, Liège – 65 log/ha

Figure 14 : Le quartier-type de type « urbain continu » : quartier Fond-Pirette – Campine à Liège

	Type	Densité	Gabarit
3	Urbain semi-continu	[21-49[	R+1 à R+2



3. Quartier « Petit Paris », Mons – 47 log/ha

Figure 15 : Le quartier de type « urbain semi-continu » : quartier Petit Paris à Mons

	Type	Densité	Gabarit
4	Semi-continu homogène, cité sociale	[14-32[	R+1 à R+3



#### 4. Cité sociale Chavée à Fontaine-L'Évêque – 17 log/ha

Figure 16 : Le quartier de type « semi-continu homogène, cité sociale » : cité sociale Chavée à Fontaine-L'Évêque.

	Type	Densité	Gabarit
5	Village, noyau rural	[14-32[	R+2 à R+3



#### 5. Noyau villageois de Rotheux

Figure 17 : Le quartier de type « village, noyau rural » : Noyau villageois de Rotheux



	Type	Densité	Gabarit
6	Lotissement périurbain	[5-14[	R+1



#### 6. Lotissement Géronsart à Jambes – 10 log/ha

Figure 18 : Le quartier de type « lotissement périurbain » : lotissement Géronsart à Jambes

	Type	Densité	Gabarit
7	Rural isolé	[0-5[	R+1 à R+3



#### 7. Ferme isolée, Grez Doiceau – 2,8 log/ha

Figure 19 : Le quartier de type « rural isolé » : ferme isolée à Grez-Doiceau

	Type	Densité	Gabarit
X	« Grands ensembles »	-	



#### X. « Petit Paris » à Mons – 207 log/ha

Figure 20 : Le quartier de type « grands ensemble » ; grand ensemble Petit Paris à Mons

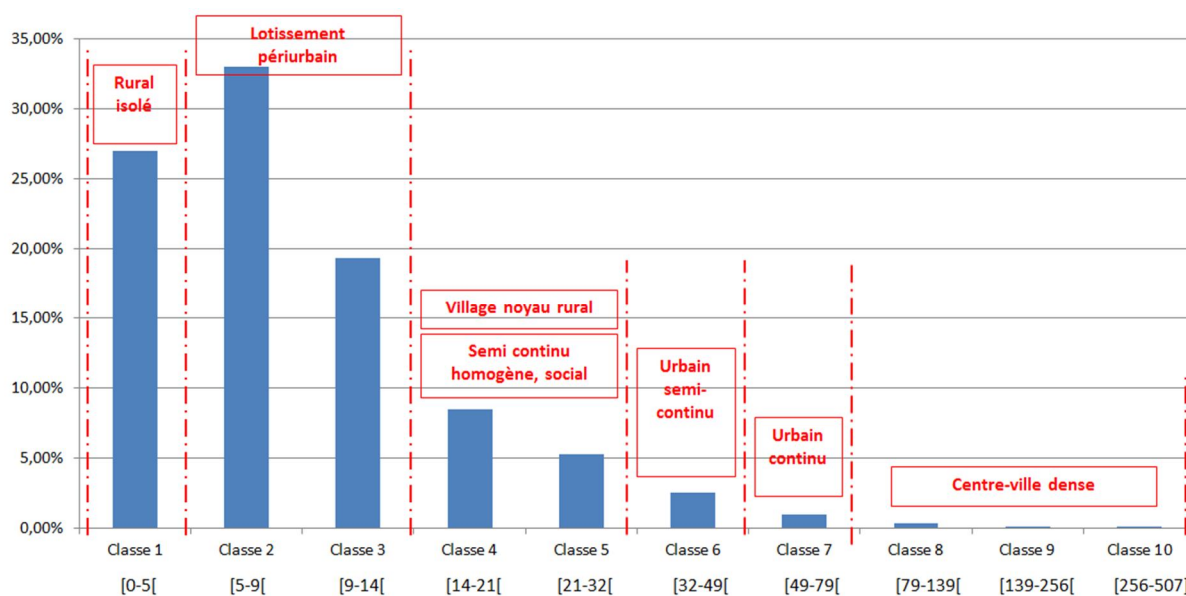


Figure 21 : Représentativité de chaque type de quartier



### 3.3. Typologie des bâtiments

#### 3.3.1. Introduction et approche adoptée dans le cadre de la recherche SOLEN

Un des objets principaux du projet de recherches SOLEN est d'étendre les résultats de SAFE à l'ensemble des bâtiments résidentiels wallons, quel que soit leur type (rural, urbain, etc.). Cet objectif implique de traiter de très nombreuses déclinaisons des bâtiments types dans les simulations thermiques dynamiques qui permettront de compléter la base de données nécessaire aux évaluations énergétiques des bâtiments et des quartiers dans l'outil interactif SOLEN à produire. Dans cette optique, la systématisation et la paramétrisation des bâtiments et des simulations à produire sont indispensables. L'approche développée dans le cadre de SAFE, une typologie de bâtiments basée sur des cas réels ne semble plus optimale dans ce contexte.

En préambule à la définition d'une typologie paramétrée des bâtiments résidentiels wallons, le présent chapitre rappelle quelques notions importantes relatives au stock bâti existant en Wallonie et aux caractéristiques principales des différents types de logements les plus courants, sur base de travaux existants. Pour plus de lisibilité, la typologie des bâtiments adoptée dans le cadre de SOLEN, et établie notamment sur base de ces travaux existants, est présentée dans le chapitre 5, relatif au volet « bâtiment ». Ce chapitre 5 présente ainsi, de façon continue, la typologie des bâtiments, les paramétrisations nécessaires à un traitement en série des analyses et la méthode adoptée dans le cadre des simulations thermiques dynamiques qui constituent la base de l'outil interactif SOLEN à développer en fin de recherche.

#### 3.3.2. Etat des lieux des logements en Région wallonne

##### 3.3.2.1. Introduction et rappels

Le parc de logements wallons est globalement ancien et de qualité thermique faible, puisque la plupart des logements ont été construits à une époque de faible coût de l'énergie et en l'absence de réglementations sur la thermique des bâtiments. Cette faible qualité thermique est toutefois très fortement améliorable, par la rénovation énergétique du stock bâti existant.

En préambule à la présentation de différentes typologies existantes, il convient certainement de rappeler quelques chiffres-clés relatifs au territoire wallon (Kints, 2008) :

- 16.844 km<sup>2</sup> (forêt 29,5%, agriculture 52,6% et zones bâties 13,6%)
- ± 1.490.000 de logements principaux (+ résidences secondaires)
- 5 provinces, 262 communes
- 3.456.775 habitants
- 2,32 personnes/ménage
- 205,2 hab/km<sup>2</sup> (UE25 : 32 ; France : 96 ; Flandre : 441 ; Pays-Bas : 3999)
- ± 1.390.000 personnes actives (15-64 ans).

Le nombre de logements et le nombre d'habitants sont en croissance. La taille des

ménages diminue depuis des décennies. La densité de population moyenne est d'environ 205 habitants / km<sup>2</sup> et on approche les 90 logements/km<sup>2</sup> (avec une répartition non homogène sur l'ensemble du territoire).

La répartition des logements en Wallonie est présentée sur la figure suivante. Rappelons qu'une densité minimale de 25 habitants/ hectare est considérée comme le seuil minimum de l'urbanisation, tandis que dans un noyau urbain, la densité dépasse 50 habitants / hectare.

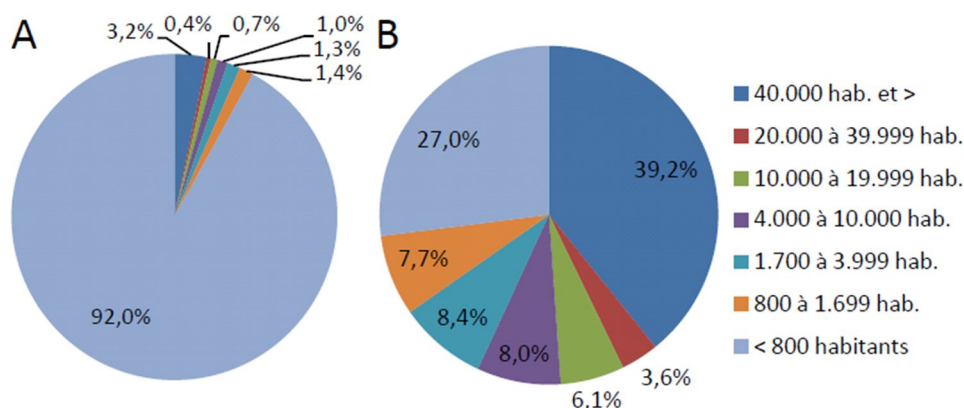


Figure 22 : A. Répartition du territoire (en superficie) en fonction de la taille des noyaux d'habitat  
B. Répartition de la population en fonction de la taille des noyaux d'habitat (Chiffres > Atlas de Wallonie, Kints 2008)

En Wallonie, 14% du territoire est couvert par des zones urbanisées et industrielles (Flandre 23%, Bruxelles 76%). L'atlas de Wallonie révèle que la population urbanisée est estimée à 49,5% (dont 20,5% dans des noyaux urbains) et couvre 3% du territoire ; ce qui signifie qu'à peine la moitié de la population habite dans des zones atteignant un minimum de densité urbaine. Ce phénomène met en avant, la tendance, depuis plusieurs décennies, à une croissance diffuse : glissement de la population depuis les zones les plus denses vers les zones périphériques (Kints, 2008).

A la lecture de ces chiffres, la Wallonie se caractérise par un grand nombre de noyaux d'habitat de plus de 50 habitants, une localisation quasi exclusive de la population dans ces noyaux et une superficie relativement faible occupée par ceux-ci. La plupart de ces noyaux d'habitat sont localisés le long du sillon Sambre-et-Meuse, dans le triangle Bruxelles-Mons-Namur et dans le Sud-Luxembourg. Dans le sud de la Wallonie, à l'exception de quelques pôles, la dispersion est grande. Rappelons que la Wallonie compte 3 villes de plus de 100.000 habitants (Charleroi, Liège et Namur) et quelques villes de plus de 40.000 habitants (Mons, Tournai, Mouscron, La Louvière, Verviers + le sud de Bruxelles). En observant le territoire wallon en fonction du niveau d'urbanisation morphologique, il apparaît qu'une grande majorité de communes sont rurales ou à urbanisation morphologique faible (Kints, 2008). La figure suivante présente la répartition des logements au sein des différentes « aires urbanistiques » tel que définies par MRW (2004).

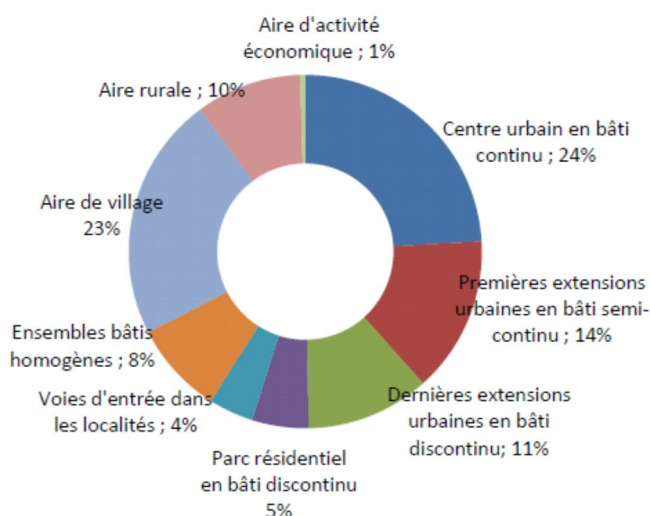


Figure 23 : Répartition des logements au sein des différentes «aires urbanistiques» (Chiffres > Enquête socio-économique 2001 - DGSIE, SPF Economie - Cartographie CREAT, UCL, 2008, Kints, 2008)

### 3.3.2.2. Les types de logements

Les statistiques cadastrales révèlent le nombre de logement selon leur type (voir tableaux ci-dessous). En Wallonie, les maisons « 4 façades » (de type ouvert) représentent 31% du stock de logements (27% en Belgique), les maisons « 3 façades » (de type demi-fermé), 23% (18% en Belgique), les mitoyennes (de type fermé) 28% (26% en Belgique) et les appartements, 13% (23% en Belgique). Sans tenir compte des appartements, 38% des maisons unifamiliales, sont des maisons « 4 façades », 28% sont des maisons « 3 façades » et 34% sont des maisons mitoyennes. Dans certaines communes, les maisons « 4 façades » représentent entre 67% et 85% du stock existant (SPF economie.fgov.be, 2013).

Tableau 5 : Nombre de logements par type et représentation (%) par région et au niveau national (Statistique cadastrale du nombre de bâtiments au 1er janvier 2011)

	Wallonie		Bruxelles Capitale		Flandre		Belgique	
Maisons de type fermé	448.923	27,78%	193.908	35,32%	692.025	22,95%	1.334.856	25,77%
Maisons de type demi-fermé	366.334	22,67%	17.304	3,15%	562.890	18,67%	946.528	18,27%
Maisons de type ouvert, fermes, châteaux	498.151	30,83%	6.092	1,11%	881.386	29,24%	1.385.629	26,75%
Buildings et immeubles à appartements	208.112	12,88%	287.841	52,43%	699.992	23,22%	1.195.945	23,09%
Maisons de	55.886	3,46%	38.094	6,94%	93.258	3,09%	187.238	3,61%

commerce								
Tous les autres bâtiments	38.491	2,38%	5.742	1,05%	85.209	2,83%	129.442	2,50%
Total	1.615.897	100%	548.981	100%	3.014.760	100%	5.179.638	100%

La Wallonie environ 13% d'appartements et 81% de maisons unifamiliales. Les maisons « 4 façades » représentent environ un tiers des logements. C'est en ville que les configurations les plus denses (appartements, maisons jumelées) sont principalement représentées. Notons que, la grande majorité des logements wallons possèdent un jardin (Kints, 2008).

Une analyse complémentaire est présentée sur la figure suivante (à gauche). Elle permet de visualiser la répartition des logements en Wallonie en fonction de leur configuration selon l'Enquête socio-économique de 2001. La partie droite de la figure illustre la répartition des logements en fonction de leur type. Par bâtiments multifamiliaux, on entend les logements situés dans de « grands immeubles à appartements » (plus de 10 logements). Ils sont principalement situés dans les grandes villes (Liège, Charleroi). Seuls 5% des logements sont situés dans des bâtiments ne comptant que 2 logements.

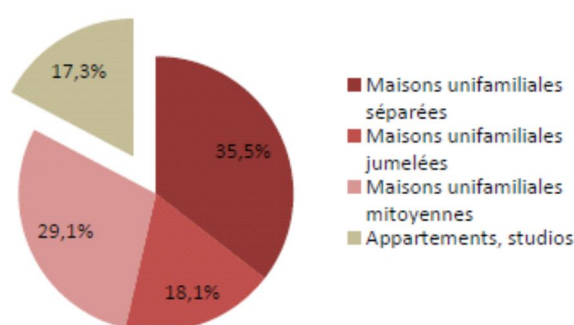


Figure 24 : Répartition des logements en fonction de leur configuration (Chiffres > Enquête socio-économique 2001 - DGSIE, SPF Economie - Non-réponses réparties %, Kints 2008)

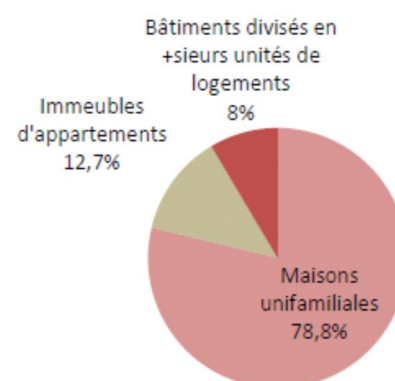


Figure 25 : Répartition des logements en fonction du type de bâtiment dont ils font partie (Chiffres > Enquête sur la qualité de l'habitat en Région wallonne 2006-2007, DGATLP, Kints 2008)

En Belgique, 64% des nouveaux bâtiments de logements construits après 1981 sont des maisons « 4 façades ». Ce phénomène s'accroît car ils étaient 45% entre 1962 et 1970, et 56% entre 1971 et 1981 (SPF economie.fgov.be, 2013). L'urbanisation diffuse (construction de villas « 4 façades » à l'extérieur des centres) reste une tendance lourde même si un ralentissement est observée depuis récemment, probablement en lien avec le marché (prix élevés). Un phénomène nouveau est l'apparition de petits immeubles à appartements en dehors des agglomérations (Kint,s 2008 Marique, 2013).

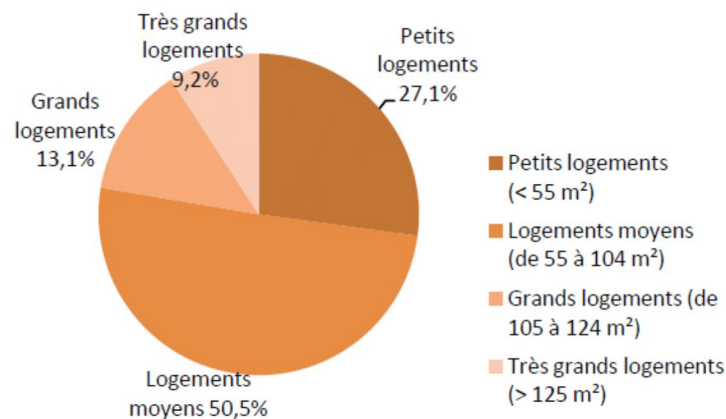
### 3.3.2.3. La taille des logements

La taille des logements peut se définir en faisant référence au nombre de pièces d'habitation ou à la superficie des pièces habitables. On entend par pièces d'habitation :

les cuisines, livings, salons, salles à manger, bureaux (à usage privé), salles de jeux, de loisirs, chambres à coucher (donc hors salles de bains, buanderies, greniers, caves, halls, garages, etc.). En Wallonie, les logements comptent en moyenne 4,8 pièces d'habitation. On considère par superficie habitable d'un logement, la superficie des pièces d'habitation définies ci-dessus. De là, découle la superficie totale, ou surface chauffée, du logement qui est égale en moyenne à 1,5 fois cette superficie habitable (l'épaisseur des murs extérieurs, les halls et dégagements, salles de bains, wc, etc. sont alors comptabilisés) (Kints 2008). En 2001, la Wallonie compte ainsi, toujours selon Kints (2008) :

- 8% de logements de taille inférieure à 35 m<sup>2</sup>,
- 19% de logements de 35 à 54 m<sup>2</sup>, soit 27% de petits logements
- 51% de logements moyens, d'une superficie comprise entre 55 et 104 m<sup>2</sup>
- 13% de logements de 105 à 124 m<sup>2</sup> : les grands logements
- 9% de très grands logements, d'une superficie supérieure à 125 m<sup>2</sup>

La superficie habitable moyenne par logement est de 81,4 m<sup>2</sup> et la superficie utile par habitant est de 33,7 m<sup>2</sup> (Voir figure ci-dessous).



*Figure 26 : Répartition des logements en fonction de leur superficie habitable  
(Chiffres > Enquête socio-économique 2001 - DGSIE, SPF Economie, Kints 2008)*

Les logements wallons peuvent être considérés, en moyenne, comme spacieux mais globalement, leur superficie habitable a tendance à diminuer (la pression sur l'espace semble s'accroître partout). Ce sont les logements d'une surface habitable comprise entre 85 et 104 m<sup>2</sup> qui ont la côte aujourd'hui. La proportion de très grands logements diminue, celle des très petits logements augmente, notamment en raison de (Kints, 2008) :

- l'augmentation du nombre de petits ménages, dont beaucoup d'isolés, qui recherchent souvent des logements abordables (donc petits) ;
- la hausse du nombre de studios et appartements dans les nouvelles constructions et les transformations ;
- l'augmentation des prix de l'immobilier et la nécessité de réaliser des économies sur l'espace.

Il est à noter que si la surface moyenne des logements a tendance à diminuer, la

superficie utile par habitant augmente de manière constante. En plus de ce constat, durant les dernières décennies, la superficie chauffée des logements a fortement augmenté (dû à la généralisation du chauffage central) (Kints, 2008).

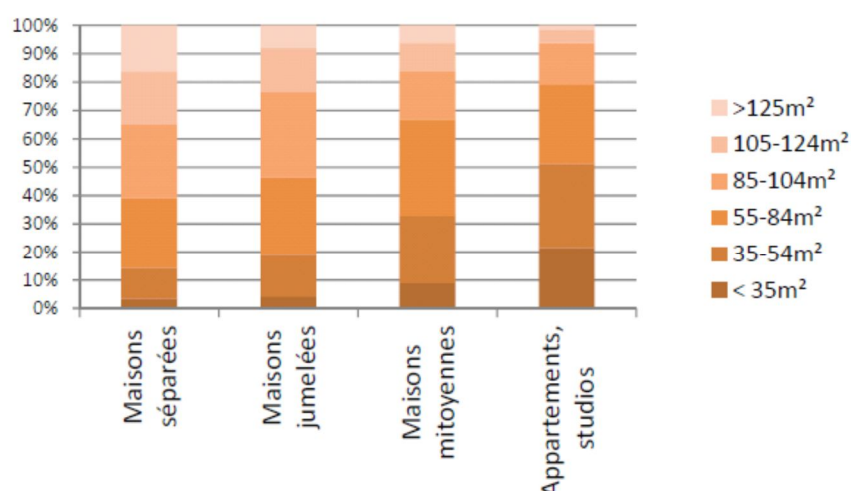


Figure 27 : Taille des logements en fonction de leur configuration  
(Chiffres > Enquête socio-économique 2001 - DGSIE, SPF Economie, Kints, 2008)

Les petits logements se rencontrent principalement dans les anciens bassins industriels avec beaucoup de petites maisons ouvrières et dans les villes et leur périphérie proche, en lien avec le type de logement (appartements, studios et maisons mitoyennes) avec la pression foncière (zones densément peuplées, parcelles plus petites) et avec les caractéristiques des ménages (nombreux locataires, petits ménages et ménages aux revenus moins élevés (beaucoup de jeunes avec peu de moyens financiers, en « début de carrière », qui louent des appartements de petite taille, de prix abordables).

Plusieurs zones de la Wallonie se caractérisent par de grands logements (taille supérieure à la moyenne du pays). On les retrouve notamment le long de l'axe Bruxelles-Namur-Luxembourg et dans le Brabant Wallon, de manière assez générale dans les communes rurales sises au sud du sillon Sambre et Meuse (cela peut s'expliquer par le fait que la pression foncière y est plus faible) et dans les banlieues accueillant des populations aisées. Les grands appartements se trouvent notamment hors des villes.

#### 3.3.2.4. Les époques de construction des logements

L'âge des logements est un paramètre important. Il a déjà été bien introduit au cours du projet de recherches SAFE. Il s'agit donc ici d'un bref rappel. La figure suivante rappelle que le parc de logements wallons est globalement ancien puisque près de la moitié des logements ont été construits avant 1945. 75% des logements datent d'avant 1980.

La répartition spatiale des logements en fonction de leur époque de construction n'est pas homogène. Elle est liée à l'histoire de l'urbanisation du pays composée de vagues successives de construction, guidées par l'extension des villes devenues régions urbaines (développement concentrique) et ensuite par une urbanisation plus diffuse. Car à l'exception des logements les plus récents, il s'avère que la qualité énergétique de la

grande majorité des logements wallons est faible : l'isolation thermique de l'enveloppe (murs extérieurs, toitures, fenêtres, sols) est le plus souvent très faible, voire absente. Pour rappel, la première réglementation sur les performances énergétiques des bâtiments neufs est entrée en vigueur en 1984, en Wallonie.

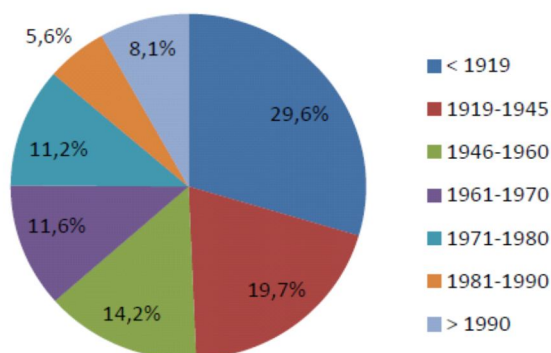


Figure 28 : Répartition des logements en fonction de leur époque de construction  
Chiffres > Enquête socio-économique 2001 - DGSIE, SPF Economie, Kints, 2008

L'âge des logements influence en grande partie leur qualité. En effet, la conception de l'habitation a évolué au cours du temps et avec elle des normes de confort.

Il existe un clivage net entre l'agglomération et la banlieue car les logements situés en agglomération sont souvent plus anciens, en raison du développement concentrique des pôles urbains. Rappelons qu'à partir des années 60 surtout, un grand nombre de ménages ont privilégié les localisations périphériques, en lien notamment avec le développement des moyens de communication. De nombreuses études empiriques ont par ailleurs montré les préférences de nombreux ménages wallons pour la vie « au vert » (la maison unifamiliale « 4 façades » construite au calme, à la campagne, reste un modèle valorisé). Cette question de l'étalement urbain en Wallonie, en ce y compris ces causes, caractéristiques et conséquences, a été largement traitée dans le cadre du projet SAFE et dans la thèse d'A-F Marique (2013).

### 3.3.2.5. La localisation des logements selon leur type

On observe un lien très marqué entre la localisation des logements et leurs caractéristiques. Comme le montrent les figures suivantes, les centres urbains concentrent essentiellement un habitat groupé avec une part importante d'appartements dans des immeubles à plusieurs étages et de maisons mitoyennes. En s'éloignant des centres urbains, la part des maisons jumelées, puis « 4 façades » s'accroît.

La différence entre agglomérations et banlieues, entre zones résidentielles des migrants alternants et zones rurales est particulièrement marquante en 2001 au niveau du type de construction (Goosens et al., 2007). Les agglomérations comptent proportionnellement plus d'appartements et de maisons mitoyennes et nettement moins de maisons à 3 façades et plus. En agglomérations, les constructions « 4 façades » représentent 13,7% des logements (voir tableau ci-dessous). De nombreuses constructions « 4 façades » se retrouvent également dans les villes plus petites en zones rurales (ne comportant pas de



région urbaine), plutôt que dans les agglomérations. Cela s'explique du fait qu'il s'agit principalement de noyaux urbains dont la délimitation administrative inclut une partie de zone suburbaine mais aussi une zone plutôt rurale, dans lesquelles les constructions ouvertes sont majoritaires. Depuis 1991 et en 10 ans, on constate que la part d'appartements s'est accrue dans toutes les zones d'urbanisation, même dans les zones suburbaines, périurbaines (zones résidentielles des migrants alternants) et rurales. C'est dans les zones résidentielles des migrants alternants (+3,4%), que la proportion d'appartements a augmenté le plus. Les logements unifamiliaux « 4 façade » en constructions n'augmentent pas et enregistrent même une tendance à la baisse au profit des « 3 façades », notamment en lien avec la pression sur les terrains à bâtir. Les logements unifamiliaux mitoyens diminuent notamment du fait que les maisons unifamiliales sont remplacées dans les agglomérations par des appartements ou par des bâtiments ayant une fonction autre que résidentielle. Cela s'observe également dans les campagnes où le nombre d'(anciennes) maisons mitoyennes est à la baisse. (Goosens et al., 2007).

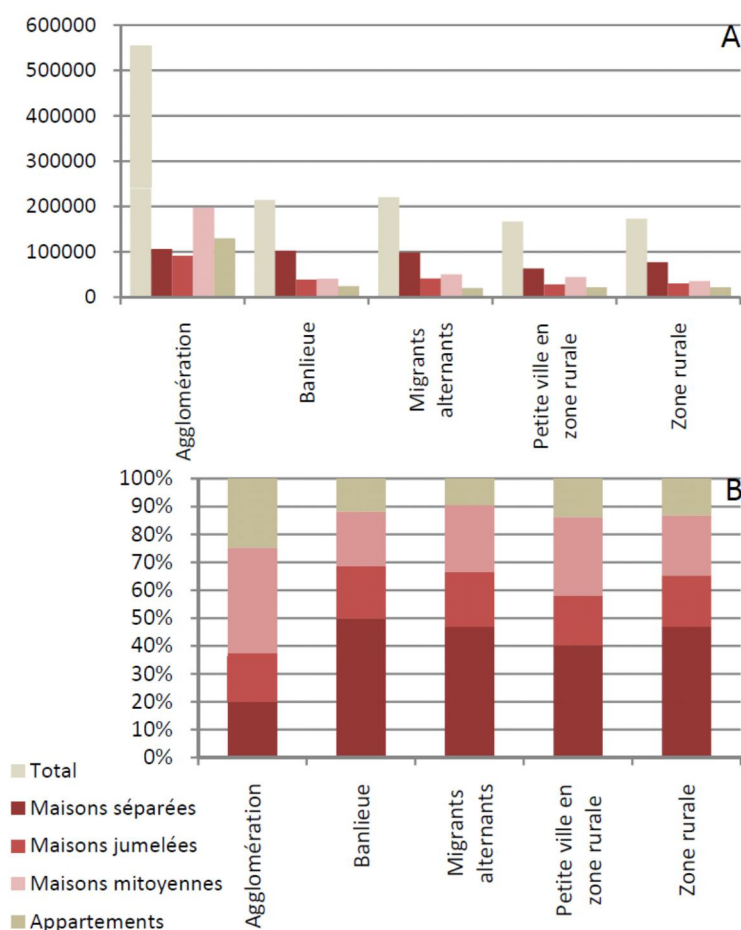


Figure 29 : Répartition des logements wallons proportionnellement (A) et en nombre (B) en fonction du degré d'urbanisation - Chiffres > ESE 2001 - DGSIE, SPF Economie, Kints, 2008



Tableau 6 : Type de construction selon le degré d'urbanisation (en %), Agglomération + banlieue = région urbaine (Source: INS - ESE 2001. Analyse: Géographie KULeuven & UCL cité dans Goosens et al., 2007)

		Ouvert	Semi-ouvert	Fermé	Appartements <sup>s</sup>	Total
Agglomérations des grandes villes et villes régionales	1991	15,5%	11,9%	28,4%	44,2%	100%
	2001	13,7%	12,7%	28,1%	45,5%	100%
	évolution	-1,9%	+0,8%	-0,3%	+1,3%	
Banlieues	1991	51,9%	20,1%	16,0%	12,0%	100%
	2001	50,8%	20,1%	14,9%	14,2%	100%
	évolution	-1,1%	0,0%	-1,1%	+2,2%	
Zones résidentielles des migrants alternants	1991	41,2%	21,6%	25,1%	12,0%	100%
	2001	41,2%	22,0%	21,8%	15,0%	100%
	évolution	-0,1%	+0,4%	-3,3%	+2,9%	
Petites villes en zone rurale (sans région urbaine)	1991	39,1%	18,2%	27,2%	15,5%	100%
	2001	39,4%	18,5%	23,2%	18,9%	100%
	évolution	+0,2%	+0,3%	-4,0%	+3,4%	
Zone rurale	1991	55,8%	19,1%	15,8%	9,2%	100%
	2001	55,1%	19,7%	13,9%	11,3%	100%
	évolution	-0,7%	+0,6%	-1,9%	+2,0%	

### 3.3.3. Les typologies prioritaires de logements

Une série de « cas types », largement représentatifs de l'ensemble des logements de la Wallonie, peuvent être identifiés sur base de critères autres que leur niveau d'isolation, à savoir : leur âge, leur taille, leur configuration, leur localisation, certaines caractéristiques constructives, le type d'occupation, etc. comme illustré sur la figure suivante (Kints, 2008).

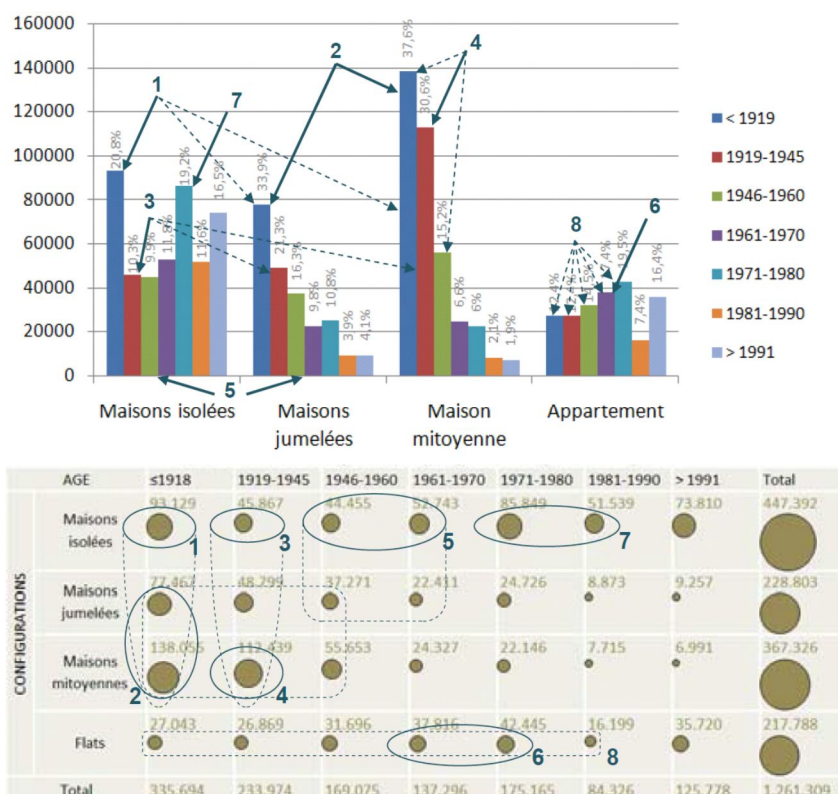


Figure 30 : Répartition des logements wallons selon leur âge et leur configuration  
Chiffres > Enquête socio-économique 2001 - DGSIE, SPF Economie, Kints, 2008

Evrard et al. (2012) ont utilisé la même analyse pour également développer onze typologies de logements de base, comme illustré sur la figure suivante. Leur étude se base entre autre sur l'analyse de rapports précédents (dont celui de Kints (2008) et de différentes bases de données : ESE2001 (enquête socio-économique), PAE (audits énergétiques), certification PEB, etc.). Les performances énergétiques de chaque cas sont calculées selon la méthode PEB en considérant une série d'hypothèses.

		AGE						
		≤ 1918	1919-1945	1946-1960	1961-1970	1971-1980	1981-1996	> 1997
CONFIGURATIONS	Maisons isolées	TYPE 1	TYPE 3	TYPE 5		TYPE 7		TYPE 10
	Maisons jumelées	TYPE 2		TYPE 9				
	Maisons mitoyennes	TYPE 4						
	Flats	TYPE 8		TYPE 6		TYPE 11		

Figure 31 : Définition des 11 typologies de base (Evrard et al. 2012)

Ces onze types proposés par Evard et al. (2012), sur base de Kints (2008) sont :

1. Maison de type vernaculaire ( $\pm$  6% des logements construits avant 1991) : Le plus souvent rurale et « 4 façades », ancienne (18<sup>ème</sup>, 19<sup>ème</sup> et début 20<sup>ème</sup>)
2. Maison urbaine moyenne, début 20<sup>ème</sup> siècle ( $\pm$  16% des logements construits avant 1991) : maison mitoyenne ou semi-mitoyenne, 5 à 6 m de façade
3. Maison villageoise, entre-deux-guerres ( $\pm$  5% des logements construits avant 1991)
4. Maison ouvrière, « modeste » ( $\pm$  18% des logements construits avant 1991) : maison mitoyenne, datant d'avant 1945
5. « Villa » des premières extensions urbaines ( $\pm$  6% des logements construits avant 1991) : années 30 et surtout 50-60 : maisons moyennes à grandes, isolées ou jumelées
6. Appartement dans un immeuble type « Etrimmo » ( $\pm$  6% des logements construits avant 1991) : années 60 et 70 - Bâtiment avec balcons, ascenseur, toit souvent plat
7. Maison 4 façades type « lotissement » ( $\pm$  13% des logements construits avant 1991) : années 70 et 80, d'abord en banlieue, puis sur l'ensemble du territoire
8. Appartement dans un « bâtiment divisé en plusieurs unités de logement » ( $\pm$  6% des logements construits avant 1991) : différentes configurations et âges de bâtiments
9. Maisons de type non prioritaire (construits entre 1961 et 1996)
10. Maison d'après 1997 (construits entre 1961 et 1996)
11. Appartements de type non prioritaire (construits avant 1980)

### TYPE 1: Maison ancienne de type vernaculaire

Date de construction :	Avant 1918
Typologie :	Maison isolée - 4 façades
Type de toiture :	Toiture à 2 versants, pente 40%
Façade à rue :	Nord
Orientation du faîte:	Est - Ouest
Ouverture façade Nord [%] :	10%
Ouverture façade Est [%] :	10%
Ouverture façade Sud [%] :	20%
Ouverture façade Ouest [%] :	10%



### TYPE 2: Maison ancienne de type urbain ou villageois

Date de construction :	Avant 1918
Typologie :	Maison jumelée - 3 façades
Type de toiture :	Toiture à 2 versants, pente 40%
Façade à rue :	Nord
Orientation du faîte:	Est-Ouest
Ouverture façade Nord [%] :	20%
Ouverture façade Est [%] :	0%
Ouverture façade Sud [%] :	20%
Ouverture façade Ouest [%] :	10%



### TYPE 3: Maison villageoise de l'entre deux guerres

Date de construction :	Entre 1919 et 1945
Typologie :	Maison jumelée - 3 façades
Type de toiture :	Toiture à 2 versants, pente 40%
Façade à rue :	Nord
Orientation du faîte:	Est - Ouest
Ouverture façade Nord [%] :	20%
Ouverture façade Est [%] :	0%
Ouverture façade Sud [%] :	20%
Ouverture façade Ouest [%] :	10%



### TYPE 4: Maison urbaine d'avant 1960

Date de construction :	Entre 1919 et 1960
Typologie :	Maison mitoyenne - 2 façades
Type de toiture :	Toiture à 2 versants, pente 40%
Façade à rue :	Nord
Orientation du faîte:	Est - Ouest
Ouverture façade Nord [%] :	30%
Ouverture façade Est [%] :	0%
Ouverture façade Sud [%] :	30%
Ouverture façade Ouest [%] :	0%



### TYPE 5: Maison des premières extensions urbaines

Date de construction :	Entre 1946 et 1970
Typologie :	Maison jumelée - 3 façades
Type de toiture :	Toiture à 2 versants, pente 40%
Façade à rue :	Nord
Orientation du faîte:	Est - Ouest
Ouverture façade Nord [%] :	20%
Ouverture façade Est [%] :	0%
Ouverture façade Sud [%] :	20%
Ouverture façade Ouest [%] :	15%



### TYPE 6: Appartement des années 60 et 70

Date de construction :	Entre 1961 et 1980
Typologie :	Appartement
Type de toiture :	-
Façade à rue :	Nord
Orientation du faîte:	-
Ouverture façade Nord [%] :	30%
Ouverture façade Est [%] :	0%
Ouverture façade Sud [%] :	30%
Ouverture façade Ouest [%] :	0%



### TYPE 7: Maison type lotissement

Date de construction :	Entre 1971 et 1996
Typologie :	Maison isolée - 4 façades
Type de toiture :	Toiture à 2 versants, pente 40%
Façade à rue :	Nord
Orientation du faîte:	Est - Ouest
Ouverture façade Nord [%] :	20%
Ouverture façade Est [%] :	15%
Ouverture façade Sud [%] :	20%
Ouverture façade Ouest [%] :	15%





#### TYPE 8: Appartement dans un immeuble transformé

Date de construction :	Avant 1960
Typologie :	Appartement 3 façades
Type de toiture :	-
Façade à rue :	Nord
Orientation du faîte:	-
Ouverture façade Nord [%] :	20%
Ouverture façade Est [%] :	0%
Ouverture façade Sud [%] :	20%
Ouverture façade Ouest [%] :	15%



#### TYPE 9: Maison de type non prioritaire

Date de construction :	Entre 1961 et 1996
Typologie :	Maison jumelée - 3 façades
Type de toiture :	Toiture à 2 versants, pente 40%
Façade à rue :	Nord
Orientation du faîte:	Est - Ouest
Ouverture façade Nord [%] :	20%
Ouverture façade Est [%] :	0%
Ouverture façade Sud [%] :	20%
Ouverture façade Ouest [%] :	15%



#### TYPE 10: Maison d'après 1997

Date de construction :	Entre 1961 et 1996
Typologie :	Maison isolée - 4 façades
Type de toiture :	Toiture à 2 versants, pente 40%
Façade à rue :	Nord
Orientation du faîte:	Est - Ouest
Ouverture façade Nord [%] :	20%
Ouverture façade Est [%] :	10%
Ouverture façade Sud [%] :	25%
Ouverture façade Ouest [%] :	10%



#### TYPE 11: Appartement de type non prioritaire

Date de construction :	Après 1980
Typologie :	Appartement
Type de toiture :	-
Façade à rue :	Nord
Orientation du faîte:	-
Ouverture façade Nord [%] :	25%
Ouverture façade Est [%] :	0%
Ouverture façade Sud [%] :	25%
Ouverture façade Ouest [%] :	0%



Figure 32 : Définition des 11 types de base d'Evrard et al. (2012)

#### 3.3.4. Les caractéristiques des types de logement par aires urbanistiques

Le Guide d'Urbanisme pour la Wallonie (MRW, 2004) permet de mieux cibler les types de logements que l'on peut retrouver dans les différents types d'aires urbanistiques ou de quartiers. Cette typologie n'est toutefois pas spatialisée et il est impossible de cartographier la répartition des aires urbaines, selon leur type, sur le territoire wallon.

##### 1. Centre-ville continu dense ou l'aire du centre de la ville en bâti continu, très forte densité :

- Forte densité (+/- 40 logements par hectare) avec des logements diversifiés : logements collectifs, unifamiliaux, sociaux et de standing.
- Constructions implantées de façon contigüe, le plus souvent à la limite du domaine public, à l'alignement. Eventuellement, construction secondaire/annexes sur la façade arrière.
- Volumétrie : les constructions principales ont une profondeur maximale de 12 mètres et les constructions secondaires et annexes ont une profondeur maximale de 6 mètres. Une hauteur moyenne de référence est respectée. Toiture à deux

versants

- Parcellaires : au minimum 5,5 mètres de large

2. L'aire des premières extensions de la ville en bâti semi-continu, densité moyenne :

- Transition entre les aires de bâti continu du centre et les aires résidentielles des périphéries. La densité se situe également entre les deux avec une ordonnance semi-continue. La structure est de type urbain (réseau de rues formants des îlots parcellaires étroits, en mitoyenneté, gabarit > 5m sous gouttières (2niveaux), etc.) Ce sont d'anciens hameaux, villages ou cités ouvrières.
- Bâti hétérogène. Principalement du logement, proche d'équipement du centre aggloméré
- Option urbanistique : +/- 20 logements par hectare, favoriser la construction de petits immeubles à appartements et de maisons unifamiliales avec jardin.
- Implantation : constructions principales mitoyennes ou trois façades dans le prolongement des fronts de bâtisse existants (6 mètres max par rapport à l'alignement), construction secondaire sur la façade latérale ou arrière.
- Nouveaux parcellaires d'habitation unifamiliales : largeur à rue de min 6,5 mètres et max 13 mètres.
- Volumétrie : les constructions principales ont une profondeur maximale de 12 mètres et les constructions secondaires et annexes ont une profondeur maximale de 6 mètres (max 18 mètres en tout). Une hauteur de minimum 2 niveaux sous gouttières, maximum 3. Toiture à deux versants (principalement), toiture des constructions secondaires sur la façade latérale : à versant ou arrière : à versant ou plate. Corniches saillantes.

3. L'aire des dernières extensions de la ville en bâti discontinu, faible densité :

- Zones résidentielles des périphéries d'agglomération situées à grandes distances des centres (caractéristique de la seconde moitié du XXème). Densité faible, mixité des activités peu encouragée. Modèle dominant de construction : « villa isolée »
- Densité : +/- 10 logements par hectare.
- Implantation : urbanisation discontinue, construction implantée au milieu de parcelles de largeurs identiques avec recul important par rapport à la voirie.
- Implantation « future » : diversification de la taille des parcelles et de l'implantation des constructions (plus en bordure), bâtiment isolé ou semi-mitoyen.
- Construction : isolées ou à trois façades, recul de 6 mètres maximum par rapport à l'alignement parfois 10 mètres si voirie à grande circulation. Construction secondaire sur la façade latérale (plus rarement sur la façade avant) ou arrière.
- Volumétrie : profondeur maximale de 12 mètres, et 6 mètres pour les constructions secondaires ou annexes ; maximum 2 niveaux sous gouttières ; toiture à deux versants (autres types envisageable pour continuer un mode d'urbanisation existant).
- Zone de recul : de plain-pied, et zone de cours et jardins (à l'arrière) : leur but est d'être préservées donc pas de constructions secondaires ou annexes, espace vert au profit des riverains.

- Parcellaire : diversification de nouveaux lots destinés à la construction d'habitations unifamiliales par l'alternance des lots de faibles et grandes largeurs à rue (10 mètres et 30 mètres) ; la création de lots de fond n'est pas encouragée (troubles du voisinage).
- Voirie : peu de rue en impasse, réseau maillé

#### 4. L'aire de parc résidentiel en bâti discontinu, très faible densité :

- Très faible densité de logement et forte proportion d'espaces verts. Se trouve dans la périphérie de la plupart des grandes agglomérations (lieu d'innovation architecturale).
- Densité : max 3 logements par hectare
- Implantation : l'ensemble de la construction est isolé et implanté de façon à assurer le maintien de la végétation existante, il respecte le relief naturel du terrain et les voiries suivent également ce relief.
- Volumétrie : maximum 2 niveaux sous gouttières ; toiture : pas lieu de chercher une unité
- Parcellaire : en cas de lotissement nouveau, superficie minimale de 30 ares
- Voirie réseau maillé, peu de rues en impasse

#### 5. L'aire des ensembles bâtis homogènes

- Composée de logements bâtis de façon répétitive formant ainsi un rue, un ilot ou un quartier résultant d'opération menées pas des industriels soucieux d'abriter leur main d'œuvre (logement ouvrier, etc.) soit par des pouvoirs publics pour la création de logements sociaux, soit par des promoteurs immobiliers ou des entrepreneurs (logement moyens ou bourgeois)

#### 6. L'aire des villages

- Territoire urbanisé du village : noyau originel et extensions.
- Noyau originel : Souvent très homogène (bâtiments agricoles, ouvriers)
- Extensions (parfois dans le noyau) : habitat pavillonnaire, de grands bâtiments à fonction agricole mais de type industriel ont été construits.
- Bâtiments agricoles abandonnés transformés en résidences principales ou secondaires
- Mal desservi par les transports en commun.
- Option urbanistique : maintenir et renforcer la mixité des activités (agriculture et petites entreprises locales) afin de diminuer l'effet dortoir, garder une juste proportion entre résident et permanent et à titre secondaire. Renforcement de leurs caractéristiques urbanistiques et architecturales (respect des caractéristiques les plus importantes des constructions traditionnelles)
- Densité : +/- 10 logements par hectare (limitation de la densité sauf dans les cœurs de village car proximité des services). Eviter les zones d'habitat inscrites sous la forme de ruban (la densité doit rester faible).
- Pour les nouvelles constructions : respect des caractéristiques les plus importantes

des constructions traditionnelles (articulation des volumes entre eux et avec l'espace public, leur proportions, leur gabarit, leur type de toiture). Tendre vers une plus grande cohérence et une unité maximale du village dans son ensemble. Si un autre mode d'urbanisation est devenue prédominant, et qu'il n'y a plus assez de terrains disponible pour réduire cette tendance de façon significative, les dernières constructions peuvent être édifiées en respectant ce mode d'urbanisation prédominant. Il convient d'insérer les bâtiments agricoles de grandes dimensions dans le territoire urbanisé du village.

- Implantation : maintenir une cohérence urbanistique dans l'ensemble du village, l'implantation de nouveaux bâtiments se fait de façon à former des espaces-rues dont les caractéristiques correspondent au mieux à celles du noyau du village tel qu'il est composé par les bâtiments d'architecture traditionnelle.
- Pour les constructions : le plus souvent, l'implantation de l'ensemble formé par la construction principale et ses éventuelles constructions secondaires ou annexes est en bordure de l'espace public. L'agencement des bâtiments peut former des cours ouvertes ou fermées sur l'espace public (la rue). Les constructions annexes sont établies le plus près possible de la construction principale ou en fond de parcelle.
- Les constructions sont édifiées de manière attenante aux murs mitoyens d'attente.
- Profondeur : maximum 12 mètres, limitation de la profondeur pour ne pas encombrer la zone de cours et jardins et éviter les volumes de toitures trop importants. Pour les constructions secondaires ou annexes, la profondeur est de maximum 6 mètres (constructions industrielles non incluses). En tout pas plus de 18 mètres.
- Hauteur : le plus souvent la hauteur moyenne est de deux niveaux sous gouttières. Généralement ces bâtiments d'architecture traditionnelle ont le plus souvent une hauteur sensiblement constante (mais variation locale ex : église ou école et constructions secondaires ou annexes qui sont, elles, nettement inférieures).
- Toitures à versants avec faitage central (facteur d'unité important du paysage bâti que forme le village dans le paysage) idem pour les nouvelles constructions. Les constructions secondaires ou annexes ont également des toitures à versants. Les différences d'inclinaison sont nulles ou minimales.
- Les extensions se font en façade latérale ou éventuellement en façade à rue (pour préserver la zone de cours et jardins).
- Zone de recul : respect de la pente naturel, aménagement de plain-pied avec la voirie.
- Zones de cours et jardins : leur but est d'être préservé donc pas de constructions secondaires ou annexes, espace vert au profit des riverains.
- Parcellaire : diversification de nouveaux lots destinés à la construction d'habitations unifamiliales par l'alternance des lots de faibles et grandes largeurs à rue (10 mètres et 30 mètres) ; la création de lots de fond n'est pas encouragée (troubles du voisinage).
- Voirie peu de rue en impasse, réseau maillé.

## 7. L'aire rurale

- 85% du territoire de la RW non inscrits en zone d'urbanisation au plan de secteur (zones agricoles, forestières, d'espaces verts, de parc, etc.). L'inscription de territoires en zone non urbanisable poursuit 3 objectifs : préservation des lieux d'exploitation, protection des paysages et sauvegarde de l'écosystème. Eviter de miter le paysage avec des constructions qui pourraient se situer plus adéquatement en zone urbanisable.

### **3.3.5. Conclusions**

Cette section 3.3. a donné un aperçu des typologies de logements et d'aires urbaines qui existent en Wallonie et a permis d'approfondir un certain nombre de caractéristiques des principaux types de logements. Ces développements dressent un cadre général dans lequel notre typologie de logements sera proposée (voir Chapitre 5).



## 4.Phase II : Retour sur l’outil SAFE

### 4.1. Rappel des objectif de l’outil SAFE

#### 4.1.1. Contexte dans lequel l’outil interactif SAFE a été développé

Les activités humaines engendrent des consommations d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre très importantes, en particulier dans les domaines du bâtiment (pour le chauffage, l'éclairage, etc.) et du transport (déplacements pour le travail, l'école, les loisirs, etc.) qui représentent respectivement 40% et 32% de l'énergie finale consommée annuellement en Europe. Les impacts environnementaux, économiques et sociaux qui y sont liés et les dommages irréversibles qui en découlent sont maintenant largement documentés et la réduction des consommations énergétiques dans ces deux secteurs est devenue un domaine d'attention majeur.

L'efficacité énergétique dans les secteurs du bâtiment et du transport a ainsi fait l'objet, depuis la première crise pétrolière des années 70, d'un nombre très important de recherches scientifiques. Ces recherches présentent l'utilisation de modèles mathématiques et d'outils de simulation comme l'approche la plus crédible pour modéliser le comportement d'un système et prévoir ses consommations énergétiques, dans une vision globale de durabilité. Parmi les nombreux avantages qu'on leur attribue, les modèles mathématiques et outils de simulations permettent de prendre en compte un grand nombre de paramètres et de tester l'efficacité de différentes stratégies d'interventions. Ces outils sont toutefois complexes et très spécialisés et les résultats de leurs applications restent le plus souvent concentrés dans les champs académiques et scientifiques, alors même que les autorités publiques et les citoyens sont les premiers acteurs qui agissent concrètement sur le terrain et ont, dès lors, un impact potentiel très important tant sur les consommations d'énergie dans le bâtiment qu'en ce qui concerne la mobilité quotidienne.

Ainsi, les actions politiques les plus fortes ne concernent toujours presque exclusivement que les performances énergétiques des bâtiments neufs (on pensera notamment à la transposition dans le cadre législatif wallon de la Directive sur le Performance Énergétique des Bâtiments qui vise à assurer que les consommations d'énergie primaire des bâtiments neufs, construits après 2008, restent inférieures à un seuil fixé), négligeant trois éléments cruciaux mis en évidence dans la littérature scientifique comme indissociables d'une transition durable de nos territoires :

- Le potentiel de réduction des consommations qui réside dans la rénovation énergétique des bâtiments et des quartiers existants est très important et prioritaire car les bâtiments résidentiels wallons présentent, d'une façon générale, des performances énergétiques médiocres (bâti ancien et peu ou pas isolé). De plus, le taux de construction neuve est faible.
- La localisation des activités (logements, commerces, lieux d'emplois, etc.) sur le territoire a un impact majeur sur la mobilité quotidienne des ménages (distances parcourues, modes de transport, etc.) et sur les consommations qui y sont liées. Cet aspect est particulièrement important sur le territoire wallon, fortement marqué par

de fortes dynamiques de périurbanisation qui, en éloignant et séparant les activités sur le territoire, ont produit de nombreux quartiers résidentiels peu denses, éloignés des centres-villes et très dépendants de la voiture.

- Le comportement des occupants a un impact important sur les consommations énergétiques tant dans le secteur du bâtiment (choix du thermostat, etc.) que de la mobilité (choix d'un mode de transport, etc.).

La vulgarisation scientifique dans ces domaines est donc cruciale pour assurer un développement plus durable de notre territoire, réduire nos impacts environnementaux et prévenir la vulnérabilité future liée aux questions énergétiques. Informer et sensibiliser le grand public et les autorités publiques sur ces défis, leur proposer des outils d'évaluation simples et des pistes concrètes d'amélioration est primordial et pourraient rapidement mener à une réduction significative des consommations d'énergie.

L'outil interactif SAFE est l'aboutissement du projet de recherches SAFE (Suburban Areas Favoring Energy efficiency), financé par la Région wallonne de Belgique (DGO4) dans le cadre du programme mobilisateur Energywall 2009-2012. Il a été développé lors d'une collaboration étroite entre deux équipes de recherches spécialisées en architecture et en urbanisme durables : le LEMA (Local Environment: Management & Analysis) de l'Université de Liège, qui coordonnait le projet de recherches, et Architecture et climat de l'Université catholique de Louvain. Un comité d'accompagnement, composé de fonctionnaires régionaux wallons en charge de l'énergie, du bâtiment durable et de la mobilité ainsi que deux parrains industriels, ont suivi de près ces développements de façon à les rendre réellement opérationnels.

#### **4.1.2. Description rapide de l'outil SAFE**

L'outil interactif, [www.safe-energie.be](http://www.safe-energie.be) disponible gratuitement est destiné (1) à l'évaluation des consommations énergétiques relatives aux bâtiments résidentiels et aux déplacements des personnes et (2) à la proposition de différentes pistes de solutions personnalisées et chiffrées visant à améliorer l'efficacité énergétique globale (bâtiment + transport) des logements et des quartiers wallons. Il vise à combler le manque crucial d'informations et d'outils rapides destinés aux autorités publiques et aux citoyens en matière d'efficacité énergétique des bâtiments et des déplacements.

L'outil interactif [safe-energie.be](http://safe-energie.be) vise ainsi à rendre accessible à un large public (autorités régionales et locales en charge de l'urbanisme, étudiants, grand public), les résultats d'une recherche scientifique de pointe qui a mobilisé et combiné un très grand nombre de logiciels et d'outils de calculs (simulations thermiques dynamiques, analyses en cycle de vie de bâtiments, logiciels CFD, analyse du gisement solaire, systèmes d'informations géographiques, analyses statistiques multi-variées, etc.) et de données (« Recensement de la population et des logements au 1er mars 1991 » et « enquête socio-économique générale de 2001 » de l'Institut national des statistiques, « enquête qualité logement » de la Région wallonne, etc.). La communication des résultats d'une recherche scientifique innovante et sa vulgarisation vers l'ensemble des acteurs du territoire, y compris le citoyen, est primordiale et doit faire partie intégrante de toute démarche de développement durable.

Très concrètement, cet outil permet à différentes catégories d'utilisateurs d'évaluer les consommations énergétiques de leur logement et de leurs déplacements, à les comparer et à identifier, sur cette base, les actions les plus efficaces à mener pour en améliorer l'efficacité énergétique. L'outil safe-energie.be est composé de trois outils interactifs : (1) un outil d'évaluation rapide qui permet d'obtenir très rapidement, sur base d'une quantité très réduite d'informations, une première quantification des consommations énergétiques, (2) un outil d'évaluation détaillée qui permet à l'utilisateur de personnaliser finement l'analyse en fonction de ses propres données et caractéristiques et (3) un volet, plutôt destiné aux promoteurs, autorités locales en charge d'urbanisme et architectes, qui permet de mener l'évaluation énergétique de tout un quartier, selon sa composition et sa localisation. Chaque outil d'évaluation est articulé autour d'un même schéma en quatre étapes présentées sur la figure suivante.

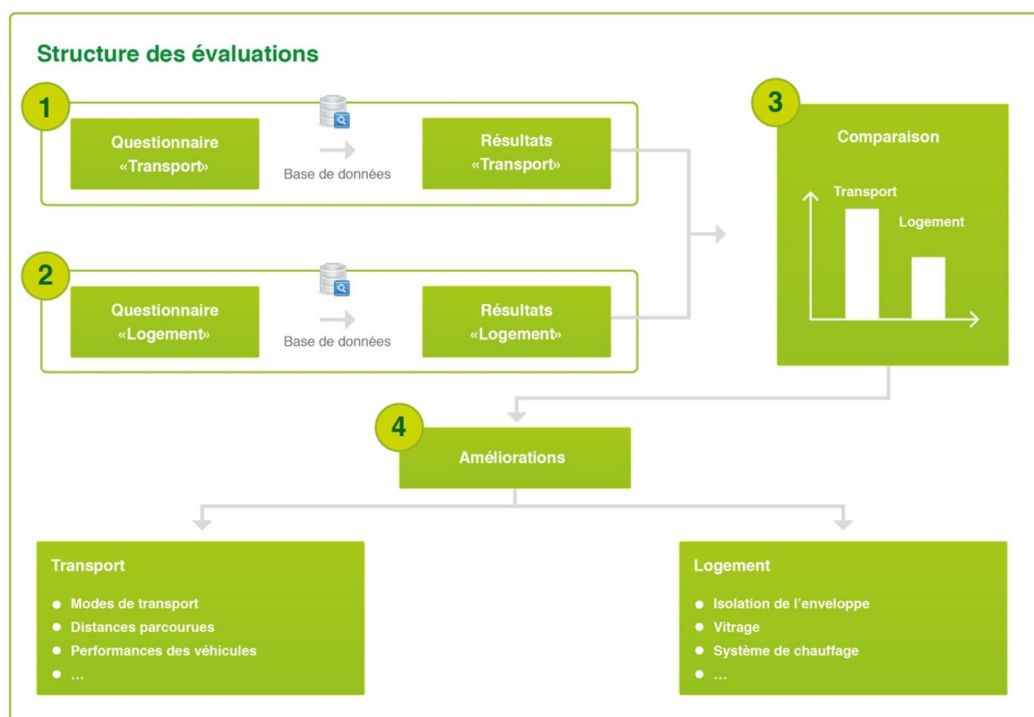


Figure 33 : Structuration de l'outil interactif SAFE en 4 étapes principales

L'utilisateur est d'abord invité à entrer un certain nombre de données concernant la mobilité. Une première évaluation de l'efficacité énergétique des déplacements est proposée sur cette base. Dans une deuxième étape, l'utilisateur est invité à compléter un formulaire relatif au logement/quartier (âge de construction, superficie, éventuels travaux de rénovation déjà entrepris, etc.). L'outil lui fournit alors une évaluation énergétique du logement/quartier. Dans une troisième étape, un graphe permet de comparer les consommations énergétiques des déplacements et celles du bâtiment, en une unité commune (kWh/an). Différentes pistes d'amélioration personnalisées sont finalement proposées à l'utilisateur pour réduire ces consommations et l'orienter vers les stratégies d'intervention les plus pertinentes. Ces améliorations concernent l'isolation, partielle ou totale, du bâtiment, le remplacement des vitrages, le changement du système de chauffage, un report modal vers les transports en commun ou la marche à pied pour une partie des déplacements quotidiens, une amélioration des performances des véhicules, etc. Les gains énergétiques potentiels relatifs à chacune de ces stratégies sont quantifiés. Enfin, dix-neuf fiches pratiques qui traitent de

l'étalement urbain et de l'aménagement du territoire, de l'efficacité énergétique des bâtiments et des quartiers ainsi que de la mobilité durable accompagnent ces outils d'évaluation. L'interface graphique et la convivialité de l'outil ont particulièrement été étudiées pour en faciliter l'utilisation.

D'utilisation très simple pour en faciliter l'appropriation par le plus grand nombre, l'outil interactif safe-energie.be est basé sur de nombreux développements méthodologiques, variations paramétriques, applications, validations, etc. qui ont été largement communiqués et reconnus par nos pairs. Parmi les éléments les plus remarquables, citons l'élaboration d'une méthode d'évaluation énergétique particulièrement innovante qui permet de prendre en compte et comparer à la fois les consommations d'énergie relatives au chauffage des bâtiments et celles relatives aux déplacements quotidiens des habitants, à l'échelle du quartier ainsi que la définition et la cartographie d'un indice de performance des déplacements qui permet de comparer les consommations pour les déplacements domicile-travail et les déplacements scolaires de l'ensemble des 9.800 quartiers wallons.

Les résultats de ces simulations sont conditionnés dans deux bases de données. Un algorithme complexe a été développé pour lier ces bases de données à l'interface simplifiée de l'outil interactif et ainsi permettre aux utilisateurs finaux de disposer simplement et de manière très lisible des résultats de près de 180.000 simulations thermiques de bâtiments et des performances énergétiques relatives aux déplacements des personnes pour plus de 800.000 scénarios (issus de la combinaison de différents choix relatifs aux distances parcourues, aux modes de transport utilisés, à la fréquence de déplacement, aux performances des véhicules, etc.).

## **4.2. Valorisation et vulgarisation de l'outil SAFE**

### **4.2.1. Communications scientifiques et « grand public »**

L'outil interactif est disponible en ligne depuis la fin du projet SAFE (juin 2012). Sa communication a été particulièrement soignée, dans le cadre du projet SAFE et après.

L'outil interactif SAFE et, plus largement, les développements méthodologiques indispensables à son élaboration et à son fonctionnement ont notamment fait l'objet de la publication d'1 thèse de doctorat, de 8 articles scientifiques dans des revues internationales avec comité de lecture et près de 20 présentations lors de conférences internationales avec comité de lecture et publications dans les actes (dans le cadre du projet SAFE, puis dans le cadre du projet SOLEN). Un article spécifiquement dédié à l'outil SAFE a été présenté lors de la conférence PLEA 2012 (Passive and Low Energy Architecture). Un autre article, également dédié à l'outil, à proposer pour publication à une revue scientifique internationale avec comité de lecture, est actuellement en cours de rédaction.

Plus largement, l'outil interactif safe-energie.be a fait, et continue de faire, l'objet d'une large communication auprès des acteurs « non scientifiques ». Il a été présenté lors de deux séminaires d'une demi-journée, qui ont réunis près de 60 fonctionnaires régionaux et communaux, promoteurs et architectes et lors d'une formation à destination des guichets de l'énergie. L'outil est également mobilisé dans le cadre du cours de « Réseaux Urbains » du

Prof. Sigrid Reiter (à destination des étudiants ingénieurs architectes et urbanistes de l'Université de Liège), dans le cadre du Master de 3ème cycle européen en Architecture et Développement Durable (MADD) organisé par l'Université catholique de Louvain et lors des « Journées Enseignement Secondaire » organisées à l'Université de Liège pour valoriser ses filières d'enseignement auprès des étudiants de l'enseignement secondaire et les informer sur les études (ingénieur civil architecte dans le cadre qui nous occupe). Enfin, l'outil interactif safe-energie.be est utilisé régulièrement lors des animations proposées par l'équipe de recherche LEMA de l'Université de Liège dans le cadre de la « Nuit des Chercheurs » et du « Printemps des Sciences ». L'outil SAFE a enfin fait l'objet de plusieurs articles dans des revues destinées aux professionnels de la construction (Les Cahiers Nouveaux, ArchiTrave).

#### **4.2.2. Les retours obtenus**

Les retours obtenus, qu'ils proviennent des acteurs de terrains, des (futurs) étudiants ou du grand public sont très positifs. L'outil proposé comble un manque réel en fournissant une évaluation simple et rapide des consommations d'énergie des bâtiments et des déplacements quotidiens. Les aspects positifs les plus couramment relevés concernent la possibilité d'identifier, pour chaque cas spécifique, les travaux d'isolation les plus performants à mettre en place et à les hiérarchiser en fonction de leur efficacité relative. La possibilité de tester l'impact de différentes localisations résidentielles sur les consommations relatives aux déplacements (dans le cadre notamment d'un déménagement envisagé) est également appréciée. Parmi les améliorations suggérées par les utilisateurs, l'intégration de l'aspect financier est le plus souvent mentionnée. Cet élément sera pris en compte lors de la mise à jour de l'outil dans le cadre du projet SOLEN. L'impact réel (changements de comportements des utilisateurs, prise de décision dans le cadre de la rénovation énergétiques, etc.) est difficile à évaluer.

L'outil SAFE participe également à renforcer l'intérêt pour les sciences. L'utilisation de l'outil interactif safe-energie.be lors de manifestations adressées aux étudiants (cours, séminaires, journées « Enseignement Secondaire ») et au grand public (« Nuit des Chercheurs », « Printemps des Sciences ») a permis de toucher et d'intéresser un large public peu familiarisé aux matières scientifiques. La facilité d'utilisation de l'outil interactif, son interface attractive et les cas d'études concrets et réalistes proposés par l'équipe de recherches qui anime ces manifestations ont permis de susciter un réel attrait des utilisateurs pour les questions d'efficacité énergétique, de conception architecturale et de mobilité durable. L'outil interactif est un point d'entrée particulièrement attractif et pertinent pour intéresser un large public (tout le monde se loge, se déplace, paie ses factures de combustible) et le mener, par la suite, à des réflexions plus poussées sur l'impact de ses choix résidentiels, sur la question de la « ville » au sens large, sur l'intérêt de la recherche scientifique en la matière, sur le développement de modèles et de méthodes d'analyse pointues, etc.

Un attrait important des étudiants et futurs étudiants (rhétos) a en particulier pu être relevé, lors des séances d'informations et des ateliers où l'outil a été utilisé. Aborder des matières scientifiques pointues et souvent perçues comme assez rébarbatives (physique du bâtiment, systèmes énergétiques, simulations thermiques dynamiques, analyses de régression statistique, cycle de vie, bases de données, etc.) d'une façon très pragmatique, concrète et orientée résultats, tout en insistant d'abord sur l'intérêt public et sur l'implication concrète des

résultats obtenus pour les citoyens et pour la société civile, permet aux (futurs) étudiants de voir l'intérêt des matières scientifiques autrement et de leur ouvrir des perspectives méconnues en matière de sciences et de recherches ainsi qu'un réel attrait pour les études présentées (ingénieur civil architecte, urbaniste).

En conclusion, les principaux intérêts de l'outil sont :

- Intérêt global pour l'approche développée, en particulier la comparaison bâtiment – transport qui est originale et indispensable.
- La simplicité d'usage et la qualité de l'interface.
- La vulgarisation scientifique que permet l'outil en rendant facilement accessibles et compréhensibles les nombreux résultats d'une recherche scientifique.

Les principales améliorations proposées sont :

- La prise en compte de plus de modes de transport et des chaînes de déplacements.
- La prise en compte d'autres postes énergétiques relatifs au bâtiment (éclairage, eau chaude, etc.).
- L'actualisation de certaines données.
- La prise en compte des énergies renouvelables.
- La prise en compte de nouveaux scénarios relatifs aux comportements des occupants.
- L'ajout de nouveaux développements, notamment plus prospectifs et stratégiques, dans l'outil d'évaluation « quartier ».
- La mise en place d'une enquête de satisfaction sur le site.
- L'ajout de données d'ordre économique, en parallèle avec les résultats purement énergétiques.
- L'extension des résultats aux bâtiments tertiaires et autres.

Les sept premières propositions d'amélioration pourront être intégrées dans le cadre du projet de recherches SOLEN. Les deux dernières sont plus spécifiques et devraient, pour pouvoir être considérées, faire l'objet d'une recherche complémentaire ou d'un avenant au projet SOLEN.

### **4.3. Données de fréquentation**

L'outil interactif [www.safe-energie.be](http://www.safe-energie.be) a été mis en ligne dans sa version définitive fin mai 2012. Les statistiques de fréquentation synthétisées sur la figure suivante sont issues de Google Analytics et concerne la période entre le 1<sup>er</sup> juin 2012 et le 31 mars 2013 (statistiques établies dans le cadre de la candidature à un prix Wernaers 2013 du fnrs). Ces statistiques seront mises à jour sur une base semestrielle ou annuelle durant la suite de la recherche.

3.153 visiteurs ont été enregistrés sur le site entre le 1<sup>er</sup> juin 2012 et le 27 mars 2013. Après la période de lancement, et hors période de congés scolaires, on enregistre, en moyenne,

entre 300 et 400 visites par mois.

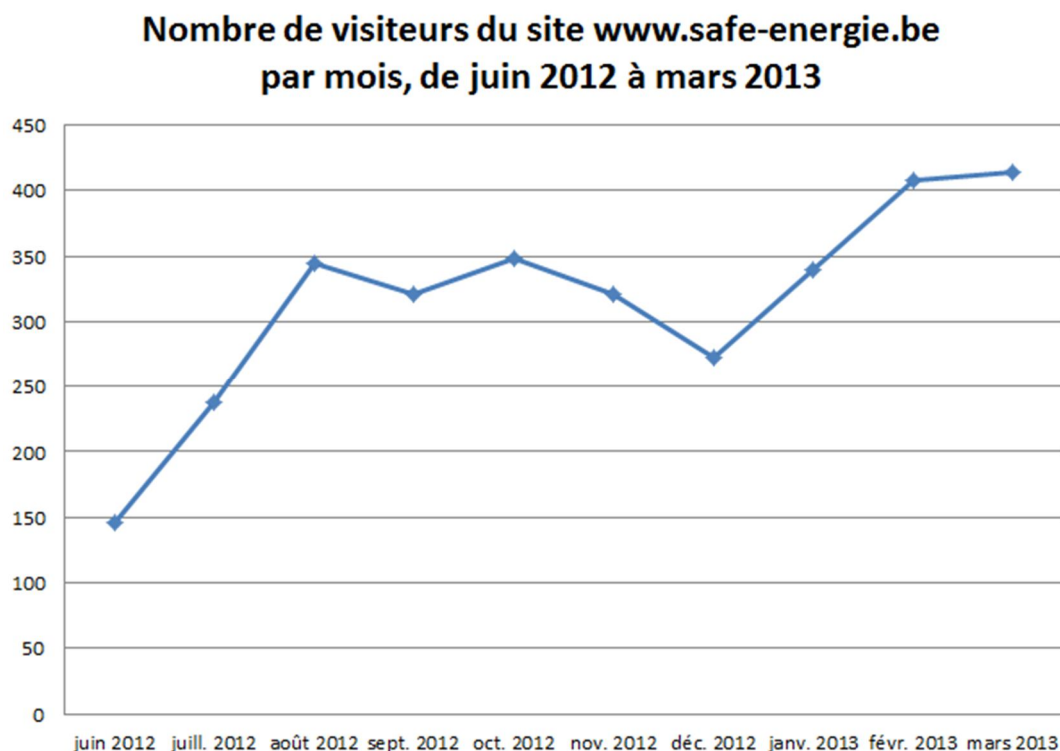


Figure 34 : Statistiques de fréquentation de l'outil interactif [www.safe-energie.be](http://www.safe-energie.be), du 1<sup>er</sup> juin 2012 au 31 mars 2013.

#### 4.4. Compléments apportés à l'outil dans le cadre du projet SOLEN

Le projet de recherches SOLEN s'inscrit dans la continuité du projet SAFE. Il vise à élargir l'approche développée dans SAFE (pour les quartiers périurbains) à tout le territoire wallon en abordant également les quartiers de type « urbain » et « rural ». Les méthodes et outils développés dans SAFE ont démontré leur intérêt et leur validité dans le cadre de l'étude des territoires périurbains. Dans le cadre du projet SOLEN, ces outils et méthodes seront adaptés et complétés de façon à être applicable à l'ensemble du territoire (et pas uniquement aux quartiers périurbains). Cette approche permettra de proposer des solutions adaptées et différenciées aux différents types de quartiers présents sur le territoire wallon et à développer une série d'outils d'évaluation applicables largement. De plus, un important volet « énergies renouvelables » est proposé dans le projet SOLEN, ce qui n'était pas le cas dans le projet SAFE, de façon à compléter notre approche globale de l'efficacité énergétique des quartiers (nous étudierons les moyens de diminuer la demande en énergie des quartiers mais aussi les moyens de combler la demande excédentaire en limitant la dépendance aux énergies fossiles). Enfin, une approche de type prospective sera proposée de façon à prendre en compte le potentiel d'accessibilité d'un lieu lors de la rénovation ou de la construction d'un nouveau bâtiment ou d'un nouveau quartier.

## 5.Phase II : Volet « bâtiment »

### 5.1. Pré-approche de la modélisation et du processus des simulations

En guise de préambule et d'introduction de la définition de la méthodologie de modélisation et de simulation des typologies testées en vue de créer la base de données « bâtiment » disponible au niveau du site internet, nous exposons ici une première approche qui n'a finalement pas été retenue.

Cette première proposition part de la méthodologie utilisée dans le projet SAFE. Mais en l'adaptant aux nouvelles hypothèses posées. Il s'agit ainsi de compléter et d'améliorer ce qui y a déjà été développé en intégrant les nouveaux types de quartiers et les nouvelles typologies de bâtiments à tester.

#### **5.1.1.Première évaluation du nombre de simulations**

Sur base des scénarios de quartiers et de logements à analyser, et en introduisant les différents paramètres qui composent les habitations, le nombre de simulations à faire peut être déduit.

Il devient intéressant de se pencher sur ce nombre de simulation à réaliser en fonction des paramètres (ou caractéristiques) exploités du logement et du nombre de sous paramètres (ou sous caractéristiques) à traiter. Car l'utilisateur a la possibilité de faire un certain nombre de choix en réalisant l'évaluation de son bâtiment. Cependant pour des raisons techniques, il faut limiter le nombre de résultats et donc de simulations à réaliser. Dans le but d'illustrer cela, le tableau ci-dessous présente les différents paramètres à traiter et propose un certain nombre de sous paramètres à traiter pour chaque caractéristique. En fonction des nombres de sous paramètres qui sont exploités, le tableau propose 3 scénarios (A, B et C) qui montrent le nombre total de simulations à effectuer en fonction du nombre de sous paramètres traités. Le nombre de résultats varie vite énormément, entre 8 389 200, en envisageant beaucoup de paramètres, à 942 000 en se limitant davantage. Face à ce constat, il devient intéressant d'envisager différentes possibilités de méthodologie.



*Tableau 7 : Trois scénarios d'évaluation du nombre de cas à simuler pour constituer la base de données « bâtiment » finale : Scénario A, B et C*

Paramètres exploités	Nombre de sous paramètres à développer	A	B	C
QUARTIER et TYPE	16 ou 21	16	21	16
ORIENTATION (NS et EO)	1	1	1	1
TAILLE	4 > 17 post résultat	17	17	15
PAROI	16	16	16	16
VITRAGE (SV, DVA, DVP, TV)	4	4	4	4
VENTILATION (Système A = C & D)	3	3	3	3
THERMOSTAT (20°C, 20-16°C)	2 ou plus (ex: 4)	2	4	2
SYSTÈME DE CHAUFFE	> 25 post résultats	25	25	25
OUVERTURE	1 ou plus	1	1	1
GI (< norme, norme PEB et > norme)	3 ou plus	3	3	1
<b>Nombre de cas pour la BDD</b>		<b>3 189 200</b>	<b>8 389 500</b>	<b>942 000</b>

Les nombres de cas pour la base de données « bâtiment » sont importants et pourraient l'être davantage si plus de paramètres étudiés étaient développés (ex: ouverture, inertie, etc.). Nous arrivons donc au constat que les techniques de modélisation et de simulation peuvent être rendues plus adaptées aux besoins d'exécutions :

- aux vues des définitions données du BE et du ZE (voir plus haut dans le texte) qui se basent sur la PEB ;
- vu les nombres de paramètres pouvant être impliqués ;
- vu le stockage des résultats dans le site sous forme d'une base de données complète et finale (car ils ne sont plus traités par une programmation quelconque par après cf. Opti d'E. Gratia (Gratia et al., 2002)) et
- dans le but d'étendre l'outil à un ensemble des consommations liées au fait d'habiter.

### **5.1.2. Proposition d'une méthodologie de modélisation**

Partant de ce constat et fort de l'expérience d'E. Gratia et d'A. Evrard (Gratia et al, 2002 et Evrard et al., 2012), il paraît intéressant d'exploiter la méthode de calcul de la PEB. Notons que cette méthodologie a été appliquée au cours du projet Epeeh (Evrard et al. 2012). Celle-ci se base sur des simulations STATIQUES calculant selon la méthode de calcul PEB, via un tableau Excel d'où des routines sont exécutées pour réaliser l'ensemble des variations paramétrées désirées. Cet outil statique serait supporté et complété par des valeurs issues de simulations DYNAMIQUES (via TAS ou Energie plus). Cette méthode offrirait plusieurs avantages :

- Méthode de calcul respectant la méthode de calcul de la PEB : méthode de calcul actuelle pour les logements, elle permet la connaissance du Espec, et a

- fait ses preuves lors du projet Epeeh ;
- Permet de répondre à la définition du BE et ZE car besoin du calcul du E et possibilité d'avoir des résultats plus complets ;
  - Donne accès directement à des résultats de calcul selon la méthode PEB de l'ECS, des auxiliaires, etc. sans manipulations, à contrario de la gestion des résultats TAS ou Energie plus qui sont moins complets ;
  - Grande souplesse dans le nombre de variations effectuées car cette méthode permet de réaliser beaucoup plus de résultats en moins de temps que sur TAS ;
  - Comme cette méthode est plus rapide, elle permet donc plus de possibilités dans les choix des paramètres à faire varier ;
  - Résultats suivant la méthode de calcul PEB qui donne des résultats tout à fait fiables et suffisamment précis vu la finalité de l'outil et l'évaluation en quelques clics d'un logement par un utilisateur ;
  - Le simulateur dynamique intervient comme support; il permettrait de calculer des coefficients moyens représentatifs de paramètres à modéliser pour les étudier soit parce que variant au cours d'un jour, par exemple, soit, parce que non pris en compte dans la PEB, et les introduire dans la méthode de calcul de la PEB du fichier Excel (ex : coefficients caractérisant l'impact des densités des quartiers types à étudier; etc.).

Illustrons plus concrètement l'application de ce dernier point par deux exemples de supports du simulateur statique par simulations dynamiques :

Exemple 1 : La PEB ne prend pas en compte l'impact de la densité du quartier dans lequel se trouve le bâtiment à analyser. Les simulations dynamiques permettraient, alors, de caractériser au moyen de différents coefficients l'impact des densités types à étudier correspondant aux différents quartiers types. Cela reviendrait à développer pour chaque type de densité à analyser, 12 coefficients mensuels soit un représentatif par mois et par quartier. Ces coefficients pourraient alors être intégrés dans le calculateur statique pour affiner un résultat au mois.

Exemple 2 : La méthode de calcul PEB, étant statique, elle prend en compte une consigne de température constante et donc ne tient pas compte de consignes de température variant au cours du jour et de la nuit. Dès lors, le support de simulation dynamique permettrait de créer des coefficients caractérisant différents types de consignes thermostatiques variant au cours de la journée. De là, une température moyenne équivalente à la consigne variante pourrait être évaluée via ces simulations dynamiques et serait reportée et intégrée dans le calculateur statique.

L'utilisation de la méthodologie statique en suivant la méthode de la PEB, au lieu d'une utilisation exclusive de simulateurs dynamiques, demanderait évidemment une phase de validation des résultats statiques et ce, au moyen de simulations dynamiques afin de démontrer le réel intérêt d'appliquer cette méthode PEB et d'assurer aucune perte d'information et de précision.

## 5.2. Définition des paramètres de modélisation

Comme nous l'avons dit, la première approche n'a finalement pas été retenue. Et ce pour plusieurs raisons. Principalement à cause de l'emploi d'une méthodologie statique qui implique l'absence de simulations dynamiques complètes et entraîne un nécessaire temps de validation supplémentaire. Mais aussi dû au fait de l'étude de cas de logements réels qui ne permet pas de balayer facilement l'ensemble des typologies d'habitations wallonnes.

Ainsi, cette deuxième, et finale, proposition se veut plus systématique et générique tout en gardant un processus de simulation dynamique.

Nous allons donc maintenant, et dans les points suivants, exposer la méthodologie utilisée pour arriver à la création et l'utilisation au niveau de l'outil informatique de la base de données « bâtiment ».

Afin d'envisager l'outil internet et de voir vers qu'elle direction il faudrait le faire évoluer, rappelons les objectifs de SOLEN en ce qui concerne les bâtiments.

1. Evaluation énergétique des quartiers-types : Modélisation de la consommation énergétique des bâtiments en phase d'utilisation, à l'aide d'un logiciel de simulation thermique dynamique.
2. Variations paramétrées et scénarios de renouvellement des quartiers.
3. Optimisation des scénarios et faisabilité des objectifs « basse énergie » et « zéro énergie ».
4. Développement de l'outil et valorisation.

La méthodologie du projet SOLEN doit donc être pensée de manière à fournir une base de données « bâtiment » permettant de caractériser au mieux l'ensemble des typologies de logements wallons au point de vue de leur consommation en énergie. La variation des paramètres doit ainsi être déterminée par les futurs choix qui seront disponibles au niveau de l'outil interactif comme pour le projet SAFE.

En outre, en plus de la précision de l'évaluation des consommations, l'impact des paramètres sur celle-ci doit être mis en avant de manière à montrer, à l'utilisateur, les caractéristiques de son logement qui influent, au plus, sur son besoin en énergie et, ainsi, de mettre sur pied des stratégies de rénovation efficace en vue de les diminuer et de tendre vers les objectifs « basse énergie » et « zéro énergie ».

Nous ne considérons ici que le besoin d'énergie nécessaire au chauffage du logement. On ne prend donc pas en compte les coûts énergétiques dus à l'électricité et l'eau chaude sanitaire. Ceux-ci seront évalués par après dans la suite de la recherche de manière à fournir une carte d'identité énergétique la plus complète du logement.

Nous allons premièrement définir les typologies de logements qui seront testées et disponibles au niveau de l'outil. Ensuite nous nous attarderons sur la composante constructive du logement soit la définition de son enveloppe c'est à dire les matériaux et les compositions utilisés dans les différentes parois à modéliser. Après nous présenterons chaque paramètre, ses variations possibles et les combinaisons modélisées de ces dernières. Nous concluons en dénombrant le nombre total de cas disponibles au niveau du site suivant cette méthode.

### 5.2.1. Les typologies de logements testées

Dans le but de construire la base de données « bâtiment », des logements types sont modélisés afin d'en effectuer des simulations paramétrées. Nous avons pris comme position de créer de toute pièce des logements et donc de ne pas modéliser des habitations existantes. Cela permet de couvrir un maximum l'ensemble du bâti wallon en augmentant les typologies étudiées et d'en faciliter les variations paramétrées. En effet modéliser des logements fictifs permet de s'approcher de la plupart des logements wallons au contraire d'une modélisation de bâtiments réels qui collerait plus à une catégorie qu'à une autre.

On distingue deux types de logement : d'une part la maison caractérisée par une double toiture inclinée et d'autre part l'appartement modélisé sous la forme d'un parallélépipède.

En outre seule l'enveloppe extérieure du logement est modélisée. Dès lors, les logements seront simulés sans leurs subdivisions internes soit de façon dynamique mono-zone.

Nous traiterons d'abord des maisons et puis des appartements. Ensuite nous reviendrons sur la simulation mono-zone et nous finirons en mettant en rapport les typologies modélisées dans SOLEN et les typologies prioritaires des logements wallons améliorables identifiés par C. Kints. (Kints, 2008).

#### 5.2.1.1. Typologies des maisons modélisées

On définit dans un premier temps 6 gabarits d'habitation, sans considération d'environnement extérieur, permettant de caractériser au mieux le parc des logements wallons. Ces 6 types ont chacun une combinaison propre du nombre d'étages et de direction c'est-à-dire : est-ce que la longueur la plus importante se trouve à rue ou sur le pignon de l'habitation ?

Dans chaque cas, 3 tailles de logements sont ensuite envisagées. Ces tailles sont fonction du gabarit et calculées à partir de la largeur et de la longueur de la maison. La taille ou surface habitable ne comptabilise pas un niveau totalement situé sous les combles. Ensuite, on calcul pour chacun des 18 logements modèles le volume chauffé, qui comprend également les combles, et finalement ses caractéristiques géométriques. Lors de cette modélisation, la hauteur d'un étage et l'angle de la toiture ont été fixé respectivement à 2,4m et 35° peu importe le gabarit.

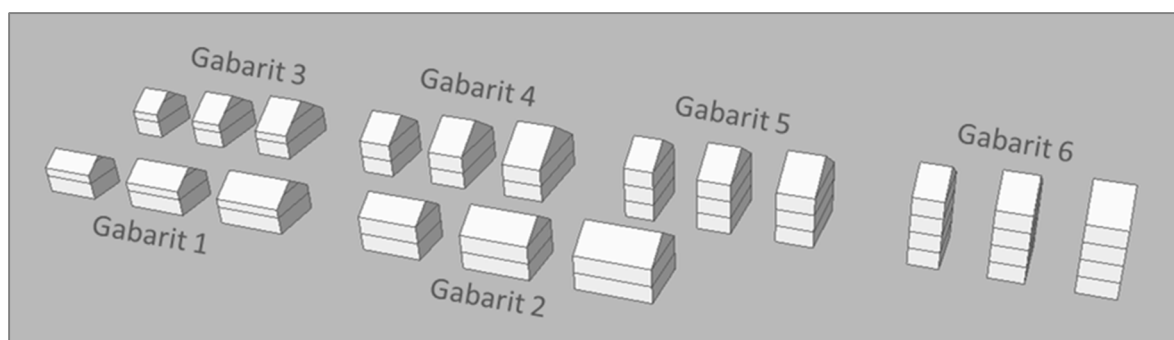


Figure 35 : Image des 18 modèles de maisons

Tableau 8 : Tableau des caractéristiques géométriques relatives aux maisons modulées

Maisons		Surface habitable [m²]	Longueur à rue [m]	Longueur du pignon [m]	Volume chauffé [m³]	Surface de toiture [m²]	Surface de façade [m²]	Surface de pignon [m²]
Longueur à rue	Gabarit 1 : R+1/2	70	7	5	157	21.4	25.2	22.4
		96	8	6	223	29.3	28.8	27.9
		126	9	7	304	38.5	32.4	33.8
	Gabarit 2 : R+1	96	8	6	281	29.3	38.4	35.1
		126	9	7	380	38.5	43.2	42.2
		160	10	8	496	48.8	48	49.6
Largeur à rue	Gabarit 3 : R+1/2	52	4	6.5	123	15.9	14.4	30.8
		72	4.5	8	180	22	16.2	40
		95	5	9.5	250	29	18	50
	Gabarit 4 : R+1	72	4.5	8	223	22	21.6	49.6
		95	5	9.5	307	29	24	61.4
		121	5.5	11	407	36.9	26.4	74
	Gabarit 5 : R+2	96	4	8	275	19.5	28.8	68.8
		121.5	4.5	9	355	24.7	32.4	79
		150	5	10	448	30.5	36	89.5
	Gabarit 6 : R+3	128	4	8	352	19.5	38.4	88
		162	4.5	9	453	24.7	43.2	100.6
		200	5	10	568	30.5	48	113.5

Lors des simulations, les pignons de ces modèles pourront être définis comme mitoyen ou non. S'ils le sont, cela entraîne une composition de paroi propre et un environnement contigu identique à celui intérieur. Cependant chaque modèle n'est pas simulé forcément en type 4, 3 et 2 façades mais en fonction du gabarit :

- **LE GABARIT 1** est simulé en 2F - 3F - 4F
- **LE GABARIT 2** est simulé en 2F - 3F - 4F
- **LE GABARIT 3** est simulé en 2F - 3F - 4F
- **LE GABARIT 4** est simulé en 2F - 3F - 4F
- **LE GABARIT 5** est simulé en 2F - 3F
- **LE GABARIT 6** est simulé en 2F

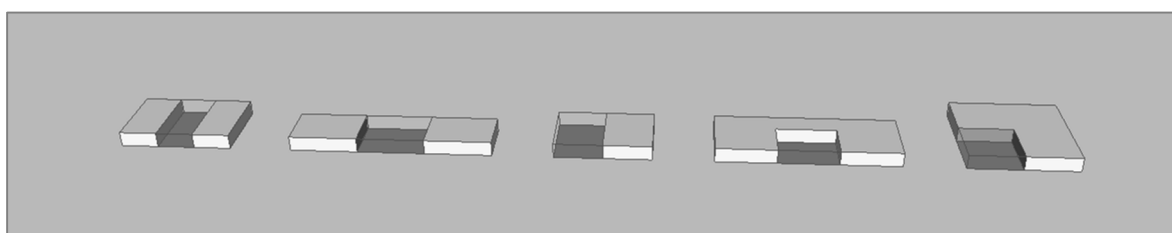
Au final, en tenant compte du gabarit et de la mitoyenneté, on aura donc trois fois 15 typologies de maisons testées et paramétrées.

### 5.2.1.2. Typologies des appartements modélisés

Dans le cas des appartements, on travaille de la même manière que les maisons. On choisit 5 gabarits d'appartement en considérant sa position en plan c'est-à-dire suivant sa forme et son rapport à la façade. Nous simulons ainsi des appartements traversant étroits et larges, des appartements 3 façades et mono-façade et finalement des appartements à 2 façades en coin. À nouveau, on modélise 3 tailles pour chaque type et on obtient ainsi 15 modèles d'appartements sans tenir compte de leur environnement pour lesquels on calcule le volume chauffé et ses caractéristiques géométriques en prenant une hauteur sous plafond de 2,4 m.

*Tableau 9 : Tableau des données géométriques relatives aux appartements modulés*

Appartements		Surface habitable [m <sup>2</sup> ]	Largeur [m]	Longueur [m]	Volume chauffé [m <sup>3</sup> ]	Surface de façade [m <sup>2</sup> ]	Surface de mitoyen [m <sup>2</sup> ]
Simplex	Gabarit 1 : Traversant étroit	50	5	10	120	12	24
		72	6	12	173	14	29
		98	7	14	235	17	34
	Gabarit 2 : Traversant large	48	8	6	115	19	14
		88	11	8	211	26	19
		140	14	10	336	34	24
	Gabarit 3 : 3 façades	48	6	8	115	14	19
		88	8	11	211	19	26
		140	10	14	336	24	34
	Gabarit 4 : Mono-façade	48	8	6	115	19	14
		70	10	7	168	24	17
		96	12	8	230	29	19
	Gabarit 5 : Façades en coin	49	7	7	118	17	17
		81	9	9	194	22	22
		121	11	11	290	26	26



*Figure 36 : Image des 5 gabarits d'appartement*

Comme les maisons, on rajoute des conditions de bords en situant l'appartement dans l'immeuble. Chaque modèle peut se trouver au rez-de-chaussée, en toiture ou à un étage intermédiaire. On a donc trois fois 15 typologies d'appartements à simuler. Il est à noter que ces typologies rassemblent uniquement des simplex. Des appartements en duplex ou triplex ne sont pas modélisés.

### 5.2.1.3. Modélisation mono-zone

Il a été décidé de simuler les logements de façon mono-zone. L'habitation est donc prise comme un seul volume sans compartimentation intérieure en plusieurs pièces.

Le désavantage est évidemment de ne pas pouvoir rendre compte des différents climats qui peuvent survenir au sein même d'une habitation ainsi que de l'interaction entre ces différentes zones. Les flux d'air et de chaleur existant de pièce en pièce et d'étage en étage sont donc gommés lors de simulations mono-zone.

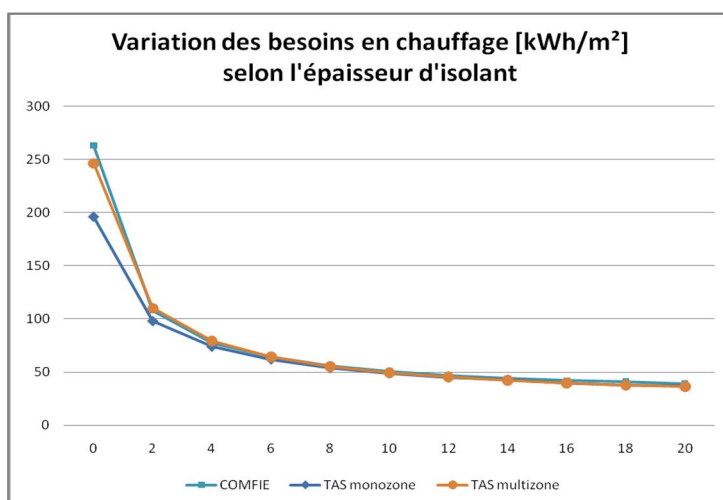
De ce fait, il n'est pas possible de pouvoir tenir compte des différentes consignes de chauffe appliquées pour chaque pièce. En effet, la consigne de chauffe choisie par l'utilisateur sera donc identique pour l'entièreté du logement alors que généralement les ambiances varient suivant les pièces de l'habitation principalement entre les pièces de jours comme le salon, de nuit comme une chambre ou encore de service comme la salle de bain.

De même, les débits de ventilation ne pourront être différenciés suivant des zones de pulsion d'air neuf dans les parties de séjour et les chambres et des zones d'extraction d'air vicié dans la cuisine et les sanitaires.

Ainsi, la simulation mono-zone ne permet pas de rendre compte des phénomènes de surchauffe qui peuvent survenir dans une pièce dû au surplus de gains internes ou solaires principalement lorsque la consigne de chauffe reste identique. C'est par exemple le cas dans un bureau où les gains dus aux équipements vont être importants ou dans une pièce possédant une baie vitrée plein Sud.

Toutefois, on cherche ici à évaluer le besoin de chauffe de l'habitation, son coût énergétique, et pas le confort des occupants. Les problèmes de surchauffe surviennent principalement durant la saison chaude. Le système de chauffage est donc à l'arrêt et nous ne considérons pas les besoins de froid. La simulation mono-zone n'a donc que peu d'influence sur les besoins totaux nets de chauffage surtout si l'habitation possède des performances énergétiques élevées comme vu dans le projet SAFE, voir Figure 37.

En conclusion simuler en mono-zone ne permet pas de rendre compte du climat particulier d'une pièce mais cela a peu d'impact sur l'étude générale du besoin de chauffe du logement qui est notre objectif principal dans ce projet.



*Figure 37 : Variation de la demande de chauffage (en kWh/m²an) en fonction de l'épaisseur d'isolant pour les cas Comfie, Tas monozone et Tas multizone (Rapport Scientifique et Technique relatif au projet de recherches SAFE, n°2, p.52)*



#### 5.2.1.4. Rapprochement avec les 8 typologies prioritaires de logements améliorables identifiées par C. Kints

En matière de rénovation du parc immobilier wallon, huit typologies prioritaires de logements améliorables ont été identifiées par C. Kints (Kints, 2008). Ces typologies nous ont permis de déterminer les principales typologies et leurs caractéristiques à modéliser pour le projet SOLEN. Ainsi les logements prioritaires wallons sont entièrement couverts par la base de données « bâtiment ».

- Les maisons de type vernaculaire ( $\pm 6\%$  des logements avant 1991) sont principalement couvertes par les gabarits 2 et 4 de grandes tailles modélisés en 4 et 3 façades.
- Les maisons urbaines moyennes, début 20<sup>e</sup> siècle ( $\pm 16\%$  des logements avant 1991) sont principalement couvertes par les gabarits 4 et 5 modélisés en 2 et 3 façades.
- Les maisons villageoises entre-deux guerres ( $\pm 5\%$  des logements avant 1991) sont principalement couvertes par les gabarits 2 et 4 de tailles moyennes modélisés en 4 et 3 façades.
- Les maisons ouvrières, « modestes » ( $\pm 18\%$  des logements avant 1991) sont principalement couvertes par les gabarits 3 et 4 modélisés en 2 et 3 façades.
- Les « Villas » des premières extensions urbaines ( $\pm 6\%$  des logements avant 1991) sont principalement couvertes par les gabarits 1 et 4 modélisés en 3 et 4 façades.
- Les appartements dans un immeuble type « Etrimmo » ( $\pm 6\%$  des logements avant 1991) sont principalement couverts par les typologies des appartements traversant et mono-façade principalement.
- Les maisons 4 façades type « lotissement » ( $\pm 13\%$  des logements avant 1991) sont principalement couvertes par les gabarits 1 et 3 modélisés en 4F.
- Les appartements dans un « bâtiment divisé en plusieurs unités de logement » ( $\pm 6\%$  des logements avant 1991) sont couverts par les typologies d'appartements en général.

### 5.2.2. Définition et composition de l'enveloppe extérieure du logement

Nous allons maintenant traiter de la composition des parois modélisées. Les différentes parois ne concernent que l'enveloppe extérieure puisque nous simulons en mono-zone et que par conséquent les subdivisions internes ne sont pas nécessaires.

Au niveau du site, concernant la composition des parois, l'utilisateur choisit dans un premier temps la période de construction de sa maison. Ce choix définit une composition par défaut (mur plein ou creux, épaisseur d'isolation et vitrage). Ensuite, il peut préciser la performance thermique de son habitation en choisissant l'épaisseur de l'isolation des murs extérieurs, de la toiture et de la dalle de sol ainsi que le type de vitrage.

En conclusion, les types de parois à modéliser sont le mur extérieur plein, le mur extérieur creux, le mur mitoyen, la toiture en pente, la toiture plate, la dalle de sol et le plancher d'appartement. À partir de là, l'ensemble des compositions de parois disponibles sera obtenu au moyen de la variation de l'épaisseur de l'isolant et du vitrage.

#### 5.2.2.1. Choix des matériaux

Avant d'explicitier les différentes compositions de parois, il convient de présenter l'ensemble des matériaux qui sont utilisés dans la modélisation de celles-ci. Leur choix provient de celui effectué dans le projet SAFE. Leurs caractéristiques physiques ont directement été reprises.

Tableau 10 : Caractéristiques des matériaux utilisés dans la composition des parois testées

Matériaux	Conductivité thermique $\lambda$ [W/mK]	Densité $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Capacité thermique c [kJ/kg.K]	Vapeur Diffusion Factor	Diffusivité thermique a [m <sup>2</sup> /s]	Effusivité thermique $\beta$ [(W/m <sup>2</sup> K) <sup>1/2</sup> ]
Enduit de plâtre	0.52	1300	0.84	10	6.17143	12.56
Bloc de béton	1.32	2000	1	100	8.55360	27.08
Isolation	0.04	40	0.84	2	15.42857	0.61
Brique	0.26	850	1	10	3.96424	7.84
Carreaux de grès	1.2	2000	0.84	9999	9.25714	23.66
Plancher collé	0.13	525	1.88	30	1.70699	5.97
Chape de béton	0.37	1200	0.84	100	4.75714	10.18
Hourdis	1.23	1200	0.84	10	15.81429	18.56

#### 5.2.2.2. Composition des parois modélisées

La valeur des coefficients de transmission thermique U [W/m<sup>2</sup>K] est donnée à titre indicatif et a été calculée sur base de la réglementation PEB. Elle est déterminée exactement au niveau du logiciel de simulation.

Les parois avec isolant sont également présentées à titre indicatif puisque l'épaisseur de l'isolation sera au choix de l'utilisateur dans l'outil. La composition des parois est toujours présentée de l'intérieure vers l'extérieure pour les parois verticales et du haut vers le bas

pour les parois horizontales. Dans tous les cas de paroi, seules les couches jouant un rôle thermique sont présentées et modélisées.

### Les murs extérieurs

La composition des parois extérieures d'une habitation a évolué au cours du temps. Dans un premier temps, on est passé de murs pleins à des murs creux sans isolation. Ensuite on a vu l'épaisseur de l'isolation augmenter. Dès lors, il semble logique que la composition des parois soit fonction de la période de construction choisie. On considère donc deux types de parois extérieures : les murs pleins (avant 1951) et les murs creux (après 1951). Les variations de composition ne concernant que l'isolation (de 0 à 90 mm) lorsqu'il s'agit de murs creux, les cas pour chaque période postérieure à 1951 sont déjà envisagés par la variation de l'épaisseur de l'isolant.

*Tableau 11 : Composition des parois de type « mur extérieur »*

Murs extérieurs	Mur plein en brique (pré-1951)		Mur creux (post-1951)	
	Non-isolé	Isolé	Non-isolé	Isolé
Enduit de plâtre	15 mm	15 mm	15 mm	15 mm
Blocs de béton semi-lourd	-	-	140 mm	140 mm
Brique	320 mm	320 mm	-	-
Isolation	-	60 mm	-	60 mm
Vide faiblement ventilé, $R=0,09$ [ $m^2K/W$ ]	-	-	50 mm	50 mm
Brique	-	-	90 mm	90 mm
<b>Coefficient de transmission thermique U [<math>W/m^2K</math>]</b> $R_{si} = 0.13$ $R_{se} = 0.04$	<b>0.699</b>	<b>0.341</b>	<b>1.349</b>	<b>0.446</b>

### Les murs mitoyens

On considère trois types de murs mitoyens. Le mur mitoyen plein en brique pour les simulations des maisons mitoyennes avec des murs extérieurs pleins, le mur mitoyen en blocs de béton pour les appartements et un mur mitoyen faiblement isolé correspondant à la norme PEB pour les simulations des maisons mitoyennes avec des murs creux.

On voit que le coefficient de transmission thermique reste très élevé sans la présence d'un isolant mais l'utilisation du mur mitoyen implique le même type de climat intérieur de chaque côté dans le logiciel de simulation. Il n'y a donc pas de transfert de chaleur en théorie puisque la différence de température est alors nulle. En pratique, il faudrait prendre en compte le comportement différent propre des habitants de chaque maison ou appartement. Mais à l'exception de cas rares, par exemple une famille part en vacances et donc la maison n'est pas chauffée, la perte ou le gain d'énergie par un mur mitoyen reste minime.

Tableau 12 : Composition des parois de type « mur mitoyen »

Murs mitoyens	En brique	En blocs de béton	Isolé
Enduit de plâtre	15 mm	15 mm	15 mm
Blocs de béton semi-lourd	-	140 mm	140 mm
Brique	320 mm	-	-
Isolation	-	-	30 mm
Enduit de plâtre	15 mm	15 mm	15 mm
<b>Coefficient de transmission thermique U [W/m²K]</b> $R_{si} = 0.13$ $R_{se} = R_{si}$	<b>0.646</b>	<b>2.360</b>	<b>0.852</b>

### Les toitures

Pour les maisons, on considère une toiture classique en pente de type pannes-chevrons. Toutefois, on ne tient pas compte de la structure ni du revêtement de la toiture puisque ceux-ci ont un rôle thermique négligeable et/ou sont très fortement ventilés. La toiture plate est modélisée pour les appartements en toiture. On envisage alors une toiture plate classique en béton.

Tableau 13 : Composition des parois de type « toiture »

Toitures	Toitures en pente ( $R_{se} = R_{si} = 0.13$ )		Toiture plate ( $R_{se} = 0.04$ , $R_{si} = 0.10$ )	
	Non-isolée	Isolée	Non-isolée	Isolée
Revêtement & sous-toiture				
Isolation	-	160 mm	-	160 mm
Hourdis	-	-	160 mm	160 mm
Plaque de plâtre	-	-	15 mm	15 mm
Plancher collé	15 mm	15 mm	-	-
<b>Coefficient de transmission thermique U [W/m²K]</b>	<b>2.342</b>	<b>0.231</b>	<b>2.571</b>	<b>0.233</b>

### Dalles et planchers

Dans un souci de réduction de cas, on considère la dalle de rez-de-chaussée sur sol uniquement, soit le cas le plus défavorable. Il est à noter que plus l'épaisseur d'isolation augmente plus la différence de besoin de chauffe entre une habitation sur sol et sur cave diminue comme analysé lors du projet SAFE.

Pour les cas d'appartements situés en toiture ou à un étage intermédiaire, un seul type de plancher a été modélisé.

Tableau 14 : Composition des parois de type « plancher »

Planchers	Dalle non-isolée ( $R_{se} = 0$ )	Dalle Isolée ( $R_{se} = 0$ )	Plancher d'appartement ( $R_{se} = R_{si}$ )
Plancher collé	-	-	10 mm
Carreaux de grès	10 mm	10 mm	-
Chape de béton	70 mm	70 mm	70 mm
Hourdis	160 mm	160 mm	160 mm
Isolation	-	60 mm	-
Enduit de plâtre	-	-	15 mm
<b>Coefficient de transmission thermique <math>U</math> [<math>W/m^2K</math>]</b> $R_{si} = 0.17$	<b>2.010</b>	<b>0.501</b>	<b>1.307</b>

#### 5.2.2.3. Vitrage & fenêtre

Quatre types de vitrages sont envisagés : un simple vitrage (SV), un double vitrage ancien (DVA), un double vitrage performant (DVP) et un triple vitrage (TV). À nouveau, suivant le choix de la période de construction dans un premier temps et suivant l'épaisseur d'isolant dans les murs dans un deuxième temps, un type de vitrage sera prédéfini mais l'utilisateur pourra changer celui-ci par après.

Au niveau de la fenêtre, on considère le châssis comme 15% de la surface totale de la fenêtre. Le coefficient de transmission thermique du châssis  $U_f$  est pris égal à  $2 W/m^2K$  de manière à couvrir principalement les châssis en bois,  $U$  variant environ entre 2.5 et 1.1 suivant les essences et l'épaisseur du cadre, et les châssis en plastique,  $U$  variant entre 2.2 et 1.6 suivant le nombre de chambres.

Les coefficients de transmission thermique  $U_g$  sont également donnés à titre indicatif et proviennent du site internet *Énergie+* (Énergie+, 2010). Les valeurs exactes seront reprises dans la librairie de vitrage disponible dans le logiciel de simulation de manière à approcher au mieux ces valeurs.

Tableau 15 : Coefficient de transmission thermique  $U_g$  [ $W/m^2K$ ] des vitrages modélisés

Vitrages	Simple vitrage	Double vitrage ancien	Double vitrage performant	Triple vitrage
<b>Coefficient de transmission thermique <math>U_g</math> [<math>W/m^2K</math>]</b>	5.8	2.8	1 à 1.3	0.6 à 0.8

### **5.2.3. Les paramètres et leurs variations implémentées**

Pour commencer, on énumère ici l'ensemble des paramètres modélisés ainsi que leurs variations possibles qu'elles soient au choix ou non sur le site internet et qu'elles soient simulées ou non. On regroupe les paramètres en trois classes : ceux liés à la typologie du logement, ceux liés à sa performance énergétique et ceux liés à son environnement extérieur.

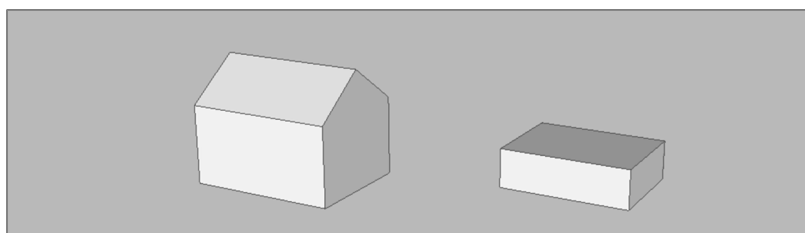
Ensuite, pour chaque groupe de paramètres, on explicite les combinaisons possibles entre leurs différentes variations. Ceci, afin dans un premier temps d'approcher au mieux des réalités constructives et de rénovation et dans un deuxième temps de réduire le nombre de cas à tester tout en gardant un grand nombre de choix au niveau de l'outil interactif.

#### **5.2.3.1. Les paramètres liés à la typologie du logement**

Ces premiers paramètres permettent de définir la physionomie du logement ainsi que le comportement de ses habitants. On retrouve donc des paramètres qui ont trait à la géométrie, à la forme ou encore aux consignes de chauffe.

##### **Le type de logement**

Deux types de logement sont envisagés : la maison et l'appartement. Pour les maisons on considère un volume de surface rectangulaire sur sol et dont la toiture est en pente. Dans le cas de l'appartement, on utilise un volume parallélépipédique d'un seul étage.



*Figure 38 : Volumétrie d'une maison et d'un appartement*

La base de données « bâtiment » ne reprend donc pas de cas de duplex ou de triplex. On pourrait envisager ces cas par après soit en réalisant des simulations pour ces typologies soit en établissant des liens entre simplex, duplex et triplex.

##### **Le gabarit : forme et nombre d'étage**

Pour les maisons on envisage 6 gabarits possibles et pour les appartements 5. Dans le cas des maisons, les gabarits sont caractérisés par un nombre d'étage (R+1/2, R+1, R+2 ou R+3) et par une direction de la surface au sol qui définit la façade à rue (largeur ou longueur) et ainsi le sens de la toiture et l'orientation des façades les plus importantes.

Les différents gabarits d'appartement sont définis par le nombre et la position des façades par rapport à la rue. On retrouve donc : des traversant étroits, des traversant larges, des 3 façades, des mono-façades et des 2 façades sur le coin.

##### **La mitoyenneté**

Les habitations sont soit des maisons mitoyennes (2 façades), semi-mitoyennes (3 façades) ou isolées (4 façades). A chaque fois, ce sont les pignons des maisons modélisées qui deviennent les mitoyens. Il est à noter que pour les maisons toutes les combinaisons de

gabarit et de mitoyenneté ne sont pas possibles.

Pour les appartements, on exprime leur mitoyenneté « verticale ». Soit il se trouve au rez-de-chaussée, on le considère alors sur sol et le plafond correspond à un plancher d'appartement. Soit il se trouve en toiture, on modélise alors le plafond comme une toiture plate et le sol comme un plancher d'appartement. Soit il se trouve à un niveau intermédiaire et le plancher d'appartement caractérise à la fois le sol et le plafond.

Suite aux 11 gabarits, on définit donc 30 typologies de logements en tenant compte des possibilités de mitoyenneté.

### La taille du logement

Pour les simulations, comme nous l'avons vu plus haut, chacun des 11 gabarits est modélisé en trois tailles, celles-ci varient suivant le gabarit et sont fonction de la largeur et de la longueur du logement ainsi que de son nombre d'étages. Les trois tailles testées sont représentatives des tailles les plus courantes du logement considéré. C'est donc à partir de ces trois tailles grâce à une extrapolation des résultats que l'on déterminera le besoin de chauffe de n'importe quelle surface du cas testé.

L'utilisateur pourra dès lors entrer la taille exacte de son logement et au contraire de l'évaluation faite dans SAFE ne devra plus choisir par intervalle de 10 m<sup>2</sup>.

Nous reviendrons par après sur l'extrapolation des résultats pour en valider l'utilisation et en expliciter le fonctionnement au niveau du site internet.

### La surface de fenêtre

La surface de fenêtre est un paramètre de modélisation qui n'est pas au choix dans l'outil. Celui-ci est fixe suivant le type de logement choisi. Ainsi on utilise un pourcentage de surface de fenêtre égale à 25% peu importe l'orientation de la façade du logement prise en compte. On ne modélise donc pas de fenêtres en toiture. La surface de fenêtre est montée à 50% pour une façade principale dans les appartements.

De même on considère que le châssis couvre 15% de la surface totale de la fenêtre. La surface du vitrage est par conséquent de 85% de celle de la fenêtre.

### Les gains internes

Les gains internes sont fixes pour chaque type d'habitation. Ceux-ci permettent de tenir compte de l'activité interne du ménage soit de la chaleur dégagée par les occupants ainsi que par les équipements et lors de cuisson. Puisque nous simulons en mono-zone, il ne sera pas possible de rendre compte du comportement de chaque pièce ainsi que des phénomènes de surchauffe.

Les gains internes sont calculés à partir de la taille du logement et du nombre d'occupants principalement. Étant donné que le nombre d'occupants ne peut varier durant les simulations, on considère une famille moyenne de 4 personnes pour calculer les gains internes dans le cas d'une maison et une famille de 3 personnes dans le cas d'un appartement.

On considère un relativement faible profil d'occupation et d'utilisation des équipements de manière à minimiser les gains internes de chaleur ce qui permet d'évaluer au mieux les besoins de chauffe. Au contraire considéré des gains internes plus importants diminuerait le besoin de chauffe mais permettrait d'évaluer les surchauffes mais ceci ne nous concerne pas ici.



On détermine donc un profil hebdomadaire de gains qui sera fixe pour chaque semaine de l'année. On ne prend pas en compte les vacances scolaires par exemple. On distingue toutefois la semaine du weekend.

Les valeurs des gains internes se basent sur le travail de C. Massart « Elaboration d'un outil d'aide à la conception de maisons à très basse consommation d'énergie : Conception de maisons neuves durables ».

Au niveau de l'occupation de l'habitation, comme montré sur la Figure 39, on considère que l'ensemble des personnes est absent 8 heures par jour un jour de semaine et 5 heures un jour de weekend. La moitié seulement est présente durant 2 heures par jour un jour de semaine et 5 heures un jour de weekend. Finalement l'ensemble des personnes sont là les 14 heures restantes.

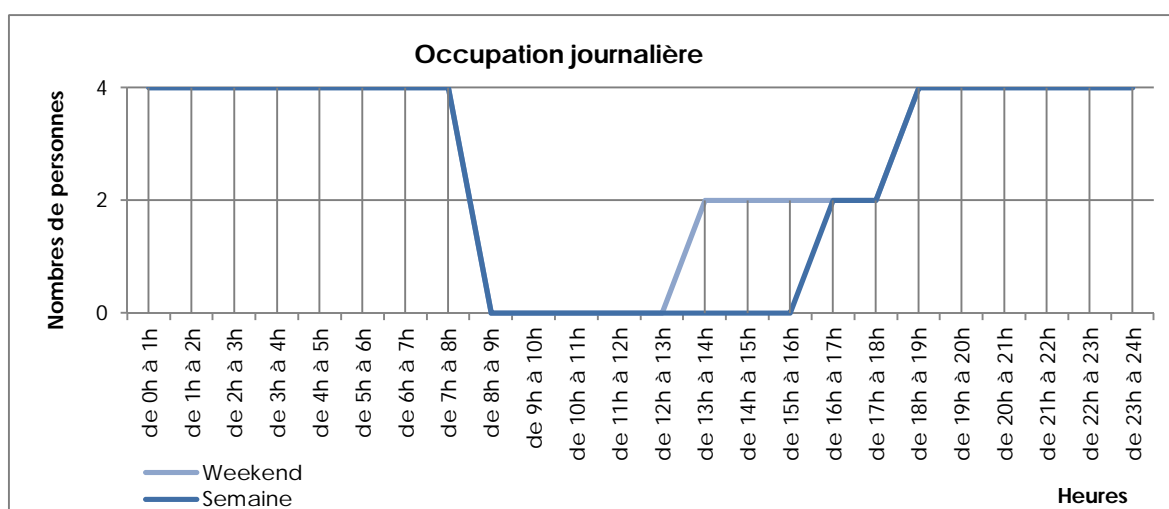


Figure 39 : Horaire journalier d'occupation (70W/pers) d'une maison testée

Au niveau des équipements, voir Figure 40, on tient compte à la fois des électroménagers avec une puissance nominale de 4 W/m<sup>2</sup> en continu lorsque l'entièreté des électroménagers fonctionnent et de l'éclairage avec une puissance nominale de 6 W/m<sup>2</sup> en continu. Pour ce dernier on envisage la maison allumée à 50% 2 heures le matin et 2 heures en pleine soirée et allumée à 25% 1h en début de soirée et 1h en fin de soirée. Le reste du temps les lampes sont éteintes.

Pour les équipements électroménagers, on considère une valeur de 12,5% constante pour tenir compte du frigo, congélateur et des lessives (ramenées à une valeur constante hebdomadaire). On y ajoute un pic à 100% en soirée lorsque l'entièreté des électroménagers fonctionne, soit avec la télévision et l'ordinateur en marche.

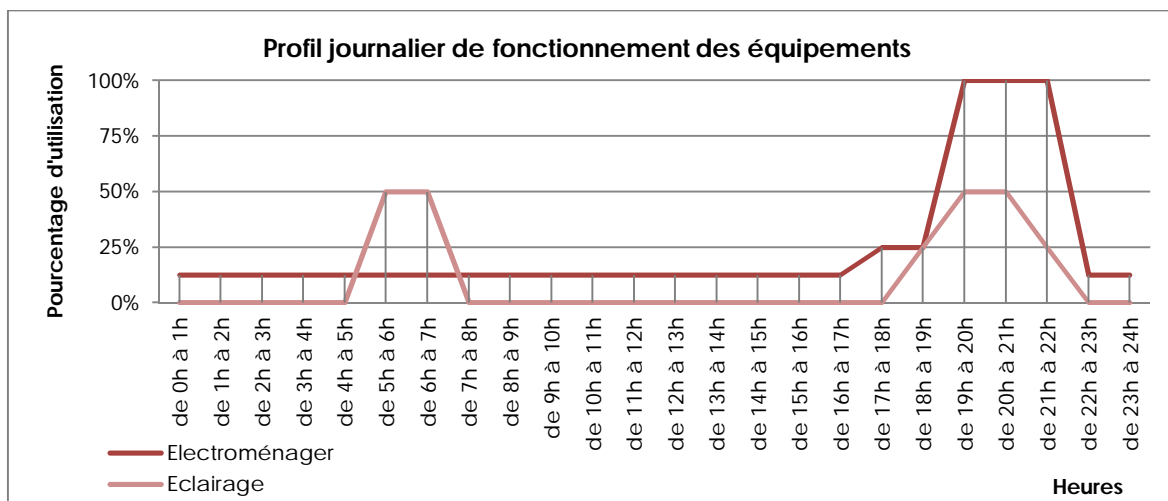


Figure 40 : Profil journalier de fonctionnement des électroménagers ( $4W/m^2$  en continu) et de l'éclairage ( $6W/m^2$  en continu) du logement testés

### Les consignes thermostatiques

Trois systèmes de thermostat sont proposés à l'utilisateur de l'outil interactif de façon à assurer le confort thermique des habitants :

- **THERMOSTAT 1** : Une température de consigne horaire continue de  $18^{\circ}C$  jour et nuit en semaine et le weekend.
- **THERMOSTAT 2** : Une température de consigne horaire continue de  $20^{\circ}C$  jour et nuit en semaine et le weekend.
- **THERMOSTAT 3** : Un thermostat  $20/16^{\circ}C$ , soit une température de consigne horaire de  $20^{\circ}C$  de 6h à 8h et de 16h à 23h avec une diminution à  $16^{\circ}C$  pendant la nuit et la journée en semaine.

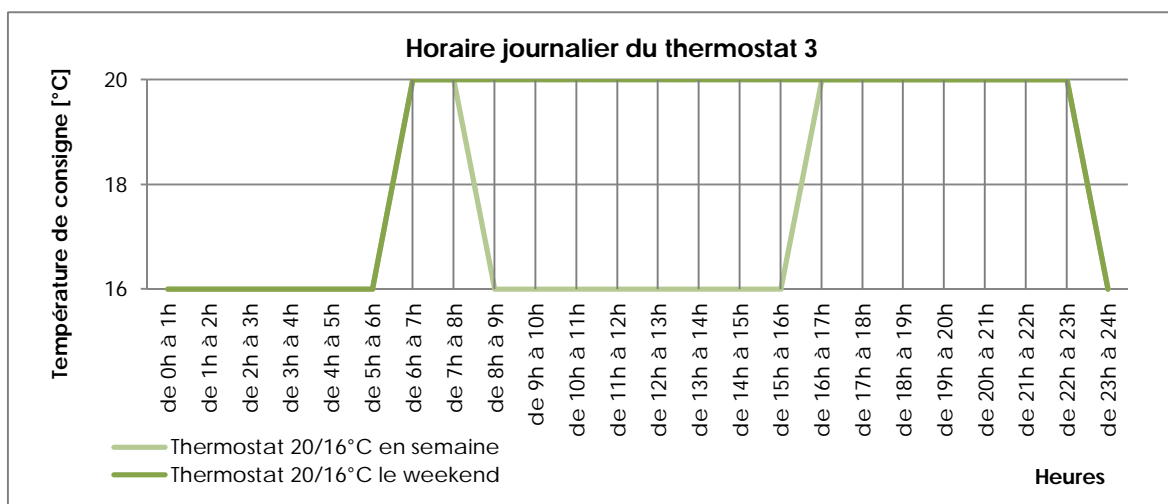


Figure 41 : Horaire journalier du thermostat  $20/16^{\circ}C$

### 5.2.3.2. Combinaisons proposées pour les typologies de logements

Au niveau des logements, toutes les combinaisons de gabarit et de mitoyenneté ne sont pas possibles (cf. Tableau 16). Pour ces trois paramètres, on obtient en tenant compte des combinaisons, 30 types de logements. On pourra dans un deuxième temps, suivant le temps que prennent les simulations, augmenter le nombre de combinaison en modélisant d'autres gabarits ou encore d'autres thermostats.

Sur le site, l'utilisateur aura donc 90 possibilités de typologies en tenant compte des thermostats proposés et sans considérer la taille du logement.

*Tableau 16 : Combinaisons proposées formant les 90 différentes typologies de logements testées au choix dans l'outil*

Typologies de logements			
Logement	Gabarit	Mitoyenneté	Thermostat
<b>Maison</b>	G1 : Longueur à rue, R+1/2	4 Façades	18°C
		3 Façades	
		2 Façades	
	G2 : Longueur à rue, R+1	4 Façades	
		3 Façades	
		2 Façades	
	G3 : Largeur à rue, R+1/2	4 Façades	20°C
		3 Façades	
		2 Façades	
	G4 : Largeur à rue, R+1	4 Façades	
		3 Façades	
		2 Façades	
	G5 : Largeur à rue, R+2	3 Façades	
		2 Façades	
	G6 : Largeur à rue, R+3	2 Façades	
<b>Appartement</b>	G1 : Traversant étroit	Rez-de-chaussée	20°C
		Intermédiaire	
		Toiture	
	G2 : Traversant large	Rez-de-chaussée	
		Intermédiaire	
		Toiture	
	G3 : 3 façades	Rez-de-chaussée	20/16°C
		Intermédiaire	
		Toiture	
	G4 : Mono-façades	Rez-de-chaussée	
		Intermédiaire	
		Toiture	
	G5 : Façades en coin	Rez-de-chaussée	
		Intermédiaire	
		Toiture	

#### 5.2.3.3. Les paramètres liés à la performance énergétique du logement

Les paramètres suivants caractérisent la physique de l'enveloppe du bâtiment et les systèmes qui permettent de contribuer au confort thermique et respiratoire des habitants. Ainsi ils traitent essentiellement de l'épaisseur de l'isolation, du vitrage et des systèmes de ventilation et de chauffage.

##### Année de construction ou performance :

Comme pour le projet SAFE, ce premier choix permet à l'utilisateur de choisir l'année de construction du logement ou un des standards proposés afin de prédéfinir les caractéristiques thermiques de son habitation. C'est sur base de ce choix que les caractéristiques constructives du bâtiment sont estimées et que les parois sont déterminées. On distingue 5 périodes de construction :

- **PRE-1950** : mur plein, pas isolé et simple vitrage
- **1951-1984** : mur creux, pas isolé et double vitrage ancien
- **1985-1995** : mur creux, 3 cm d'isolation (mur, dalle et toiture) et double vitrage ancien
- **1996-2010** : mur creux, 6 cm d'isolation (mur, dalle et toiture) et double vitrage ancien
- **POST-2011** : standard actuel pour les nouvelles constructions, cas référent suivant la réglementation PEB de 2011.

Dans le cas des standards, on impose directement le besoin de consommation peu importe la composition des parois ou encore la typologie du logement. Il n'y a donc pas de simulation. La consommation totale annuelle du logement est calculée en multipliant par les coefficients applicatifs (système de chauffe et quartier) et la surface de l'habitation.

- **STANDARD BASSE ÉNERGIE** : consommation de chauffage  $\leq 60$  kWh/m<sup>2</sup>an
- **STANDARD TRES BASSE ÉNERGIE** : consommation de chauffage  $\leq 30$  kWh/m<sup>2</sup>an
- **STANDARD PASSIF** : consommation de chauffage  $\leq 15$  kWh/m<sup>2</sup>an

##### Le type de mur extérieur

Pour rendre compte des réalités constructives du bâti wallon, deux types de murs sont disponibles pour les maisons. Ceux-ci ne sont pas au choix directement dans l'outil mais par le choix de l'année de construction. En effet, on considère un mur plein en brique pour les maisons construites avant 1951 et un mur creux pour celle construites après 1951 comme nous l'avons vu juste avant.

##### L'épaisseur d'isolation dans l'enveloppe

L'épaisseur est prédéfinie par le choix de la période de construction mais peut être modifiée par l'utilisateur pour, par exemple, rendre compte d'une rénovation antérieure.

Pour l'isolation dans les murs extérieurs, pleins ou creux, huit épaisseurs d'isolant sont proposées : 0 cm, 3 cm, 6 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm et 30 cm.

L'épaisseur de l'isolant en toiture sera alors fonction de celle placée dans les murs. Deux choix seront possibles : une épaisseur identique ou une surépaisseur de 10 cm ou plus en fonction de celle dans les murs extérieurs.

Au niveau de la dalle de sol, considérée sur sol, les mêmes huit épaisseurs que dans le mur sont possibles mais ce sans lien avec celles-ci.

### Le type de vitrage

Quatre types de vitrage sont envisagés : simple vitrage (SV ;  $U_g = \pm 5.8 \text{ W/m}^2\text{K}$ ), double vitrage ancien (DVA ;  $U_g = \pm 2.8 \text{ W/m}^2\text{K}$ ), double vitrage performant (DVP ;  $U_g = \pm 1.3 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) et triple vitrage (TV ;  $U_g = \pm 0.8 \text{ W/m}^2\text{K}$ ). Le type de vitrage est prédéfini par le choix de la période de construction mais peut être modifié par l'utilisateur pour par exemple rendre compte d'une rénovation antérieure.

### Le système de ventilation

La ventilation détermine la qualité de l'air intérieur du logement, celle-ci peut être naturelle ou mécanique. Dans certains cas, elle peut aussi servir de système de chauffe. On distingue trois types de ventilations proposées :

- **UN SYSTEME DE TYPE A** : Une ventilation entièrement naturelle, soit la circulation et l'extraction de l'air se fait naturellement par les jeux de pressions et l'infiltration d'air au travers de l'enveloppe ou par l'ouverture d'une fenêtre, soit sans ventilateur. Il n'y a donc pas de contrôle mécanique ni de consommation d'électricité.
- **UN SYSTEME DE TYPE C** : Une ventilation avec extraction mécanique, soit l'extraction de l'air vicié est contrôlée par des ventilateurs motorisés. On positionne les ventilateurs d'extractions de manière à rejeter l'air vicié. Soit dans la cuisine, les toilettes et les salles d'eau.
- **UN SYSTEME DE TYPE D + RC** : Une ventilation avec double flux mécanique et récupérateur de chaleur sans préchauffage. L'air extrait sortant de l'habitation et l'air pulsé extérieur passent dans un récupérateur de chaleur type échangeur à plaques qui permet de préchauffer l'air entrant. L'air pulsé est préchauffé par l'air sortant mais pas par des batteries de chauffe.

Le type de ventilation est fixe dans notre cas suivant le niveau de performance thermique de l'enveloppe soit suivant l'épaisseur d'isolation et le type de vitrage. L'utilisateur n'a donc aucun choix à faire au niveau de l'outil internet.

La ventilation est un système essentiel dans la gestion du confort thermique et respiratoire d'une habitation. En outre son impact sur le besoin de chauffe est non négligeable puisque celle-ci peut être responsable de refroidissement du logement par le renouvellement d'air lorsqu'elle est naturelle par exemple. Mais peu aussi permettre de récupérer de la chaleur et ainsi le logement est chauffé tout ou en partie par la ventilation lorsque l'on utilise une ventilation D avec récupérateur de chaleur et/ou en utilisant des batteries de préchauffage de l'air pulsé. Dans un sens ou un autre, le choix du système de ventilation influe donc sur le coût énergétique lié au chauffage d'une habitation.

Nous avons dans un premier temps décidé de fixer le choix du paramètre « ventilation » suivant les performances énergétiques de l'enveloppe du logement pour réduire le nombre de cas à tester. Dans un deuxième temps, une fois la première série de simulation finie, si les délais le permettent, il serait donc opportun d'effectuer de nouvelles simulations en faisant cette-fois varier la ventilation.

### Le système de chauffe principal

Les choix pour le système de chauffe sont les mêmes que dans le projet SAFE, deux ont été ajoutés : la micro-cogénération et la biomasse. On retrouve donc 25 possibilités au niveau de l'outil interactif.

Le système de chauffe n'est pas directement un paramètre de simulation. En effet, les simulations permettent de déterminer un besoin de chauffe réel uniquement fonction des caractéristiques physiques du bâtiment (comportement thermique des parois principalement) et des habitudes des habitants. Pour déterminer la consommation annuelle d'énergie il faut donc prendre en considération le système de chauffe qui intervient au moyen d'un coefficient qui s'applique sur le résultat de la simulation.

*Tableau 17 : Coefficients applicatifs des 25 systèmes de chauffe disponibles au niveau de l'outil*

Système de chauffe		Rendement global
Chauffage central	Chaudière à eau chaude à condensation au gaz naturel	0.80
	Chaudière à eau chaude à condensation au mazout	0.83
	Chaudière à eau chaude à condensation au propane/butane/GPL	0.81
	Chaudière à eau chaude à condensation au charbon	0.85
	Chaudière à eau chaude à condensation au bois	0.82
	Chaudière à eau chaude non à condensation au gaz naturel	0.71
	Chaudière à eau chaude non à condensation au mazout	0.74
	Chaudière à eau chaude non à condensation au propane/butane/GPL	0.73
	Chaudière à eau chaude non à condensation au charbon	0.76
	Chaudière à eau chaude non à condensation au bois	0.74
	Chauffage électrique par résistance	0.85
	Pompe à chaleur, fluide caloporteur air	2.13
	Pompe à chaleur, fluide caloporteur eau, chauffage par surface	1.74
	Pompe à chaleur, fluide caloporteur eau, autres	1.05
	Micro-cogénération	À déterminer
	Biomasse	À déterminer
Chauffage local	Poêle au bois	0.59
	Poêle au charbon	0.61
	Poêle au mazout	0.65
	Poêle au gaz	0.66
	Radiateur ou convecteur électrique sans régulation électronique	0.90
	Radiateur ou convecteur électrique avec régulation électronique	0.96
	Chauffage électrique à accumulation, sans capteur externe	0.85
	Chauffage électrique à accumulation, avec capteur externe	0.92
	Chauffage électrique à résistance incorporée dans le plancher, mur ou plafond	0.87

Ce coefficient correspond au rendement global qui va être fonction de l'unité de production de chaleur et du système installé.

Le rendement de production est fonction de l'appareil producteur de chaleur et du combustible utilisé. Dans le cas d'une pompe à chaleur, le fluide caloporteur utilisé a également son importance.

Les rendements dus au système concernent la distribution, la régulation, le stockage et l'émission de la chaleur produite. Chaque rendement exprime respectivement les pertes d'énergies, chaleur non utilisée par le logement, lors du parcours dans les conduites, pertes dues au décalage entre la demande et la production, pertes dues à la présence ou non d'un stockage et pertes lors de l'émission de la chaleur par les radiateurs ou un autre système d'émission de chaleur.

Pour chaque système de chauffage, le rendement global a été calculé suivant la méthode PEB (PEB, août 2008, annexe I). Ceux concernant la micro-cogénération et la biomasse sont encore à déterminer.



#### 5.2.3.4. Les versions PEB

Pour chacune des typologies de maisons et d'appartements une version PEB va également être testée avec le logiciel de simulation. C'est-à-dire que l'on simule chaque typologie en appliquant pour chaque paroi le coefficient de transmission thermique  $U_{\max}$  défini par la norme en vigueur (PEB, août 2008, annexe III). On rajoute donc un niveau de performance thermique supplémentaire.

*Tableau 18 : Valeurs U maximales à réaliser à partir du 1er septembre 2009 suivant la réglementation PEB de 2008 et leur équivalent en termes de composition*

Parois	$U_{\max}$ [W/m²K]	Equivalent en termes de composition
Vitrage	1,6	Double vitrage classique
Murs extérieurs	0,4	Mur creux avec 7 cm d'isolant
Toiture	0,3	Toiture avec 12,5 cm d'isolant
Dalle	0,4	Dalle avec 8 cm d'isolant
Mur mitoyen	1	Mur mitoyen avec 3 cm d'isolant

La version PEB permet de poser un cas référent. Ainsi l'utilisateur pourra toujours se situer par rapport à une valeur actuelle. Rappelons que comme dans le projet SAFE le cas référent représente le même bâtiment que celui introduit par l'utilisateur mais correspondant à ce bâtiment s'il avait été construit en 2011. Les « bâtiments référents » sont conçus pour répondre aux exigences actuelles pour les nouvelles constructions (E 80 et Espec 130, depuis septembre 2011).

### 5.2.3.5. Combinaisons proposées pour le niveau de performance énergétique du logement

Au niveau des performances énergétiques de l'habitation, comme pour les typologies, toutes les combinaisons ne sont également pas possibles (cf. Tableau 19). Ainsi le choix du type de vitrage est fonction de l'isolation dans la toiture dont le choix est lui-même dépendant de l'épaisseur d'isolation dans les murs.

L'isolation de la dalle sera quant à elle indépendante et le type de ventilation est fixe suivant la performance énergétique des parois soit suivant l'épaisseur d'isolation dans le mur et la toiture.

L'utilisateur n'a donc pas de choix à faire sur la ventilation. Toutefois, si le temps le permet, on pourrait tester d'autres possibilités de ventilation ce qui entrainerait un choix au niveau de l'outil. De même, la possibilité d'une ventilation double flux avec préchauffage pourrait également être simulée par après.

Au total en considérant le niveau de performances défini dans la réglementation PEB mais sans tenir compte du système de chauffe, il y a 689 niveaux de performances pour chaque typologie de maison et 262 pour les appartements. Au niveau du site, avec les systèmes de chauffe, on aura donc plus de 17 000 possibilités concernant la performance énergétique pour les maisons et plus de 6 500 possibilités pour les appartements.

*Tableau 19 : Combinaisons proposées à la base des différentes performances énergétiques du logement au choix dans l'outil*

Performance énergétique du logement						
Type de mur	Isolation dans la dalle	Isolation dans les murs	Isolation dans la toiture	Vitrage	Ventilation	Système de chauffe
Plein	0	0	0	SV – DVA – DVP	A	Chauffage central 16 possibilités
			16	SV – DVA – DVP	A	
	3	3	3	SV – DVA – DVP	A	
			16	SV – DVA – DVP	A	
	6	6	6	SV – DVA – DVP	A	
			16	SV – DVA – DVP	A	
	10	10	10	DVA – DVP – TV	C	
			20	DVP – TV	D	
Creux	15	15	15	DVA – DVP – TV	C	Chauffage local 9 possibilités
			30	DVP – TV	D	
	20	20	20	DVA – DVP – TV	C	
			30	DVP – TV	D	
	25	25	25	DVA – DVP – TV	C	
			35	DVP – TV	D	
	30	30	30	DVA – DVP – TV	C	
			35	DVP – TV	D	

#### 5.2.3.6. Les paramètres liés à l'environnement et au climat extérieur du logement

Nous allons maintenant traiter des paramètres qui caractérisent l'ambiance extérieure du bâtiment. Ils représentent le climat extérieur et son environnement proche. Pour ces paramètres, il n'y a pas de combinaisons spécifiques entre eux.

##### L'orientation

Au départ, le logement est modélisé avec la façade à rue au Nord ce qui donne la référence de base. Dans le cas des logements 3 et 4 façades, l'orientation est fixe. Dans les cas 2 façades (maison) et traversant (appartement), on propose à l'utilisateur d'orienter son logement suivant l'axe Nord-Sud ou Est-Ouest, la façade à rue se retrouve alors à l'Est. Finalement pour les appartements mono-façade et les appartements en coin, les quatre orientations principales seront possibles à rue : Nord, Est, Sud et Ouest.



Figure 42 : Orientation de base suivant la mitoyenneté du logement

##### Le quartier

Un coefficient applicatif permet de rendre compte de l'impact de la morphologie du quartier sur le besoin de chauffe de l'habitation. Ce coefficient rend compte de la densité et des masques. Ce coefficient est fonction du type de quartier et ce peu importe l'orientation sauf dans le cas des appartements mono-façade et ceux ayant leurs façades en coin. Rappelons les types de quartiers qui seront au choix sur l'outil internet :

- Centre-ville dense
- Urbain continu
- Première couronne, semi-continu
- Semi continu homogène, cité sociale
- Village, noyau rural
- Discontinu, lotissement périurbain
- Rural isolé
- « Grands ensembles » & autres

L'impact de la densité de logement sera donc pris en compte grâce au choix du type de quartier habité. Cet impact sera exploité et permettra donc de conscientiser l'utilisateur dans le choix du quartier habité.

##### La commune

Les logements seront testés suivant le climat de la station météorologique située à Uccle. De manière à rendre compte de la position géographique du logement et donc de la variation du climat d'un point à l'autre de la Wallonie, un coefficient de correction fonction du nombre de degrés-jour de différence entre la commune considérée et la commune d'Uccle est utilisé.

#### **5.2.4. Nombre de cas simulés et récapitulatif des possibilités présentes dans la base de données « bâtiment » sur le site internet**

Pour conclure sur la méthodologie de modélisation, nous dénombrons et explicitons ci-après l'ensemble des cas de logements possibles au niveau de l'outil interactif disponible sur le net.

Suivant les combinaisons de variation de paramètres possibles, on retrouve 130 221 cas "maison" et 30 654 cas "appartement" en croisant typologies, performances énergétiques et environnement. Il y a donc un total de 160 875 logements qui sont modélisés et testés. Ramené en kWh/m<sup>2</sup>an et en rajoutant les trois standards, on retrouve un total de 53 628 cas dans la base de données « bâtiment ».

Au final au niveau de l'outil internet, pour avoir le nombre de possibilités disponibles, il faut encore multiplier par les 25 systèmes de chauffe et les 8 coefficients relatifs aux quartiers. On dépasse ainsi les 10 millions de possibilités. Et ce, sans tenir compte de la taille du logement qui reste totalement au choix de l'utilisateur et de la localisation du logement qui permet d'exprimer la différence de climat suivant la commune.

On retrouve ainsi sur les deux pages suivantes deux tableaux récapitulatifs des cas possibles au niveau de l'outil internet. Le premier pour les maisons, Tableau 20, et le second pour les appartements, Tableau 21.

Tableau 20 : Récapitulatif des combinaisons des cas « Maison » possibles au niveau de l'outil internet

POSSIBILITES DE CHOIX POUR LES MAISONS																			
TYPOLOGIE				CLIMAT & ENVIRONNEMENT			PERFORMANCE ENERGETIQUE												
Thermostat	Direction	Etage	Mitoyenneté	Orientation	Commune	Quartier	Type de mur	Isolation dans la dalle	Isolation dans les murs	Isolation dans la toiture	Vitrage	Ventilation	Système de chauffe						
18°C	Longueur à rue	R+1/2	4 Façades	N	262 communes wallonnes	Centre-ville dense	Plein	0	0	0	SV-DVA-DVP	A		Chauffage central					
			3 Façades	N-S		16													
			2 Façades	E-O															
		R+1	4 Façades	N		Urbain continu		3	3	3									
			3 Façades	N-S		16													
			2 Façades	E-O		6		6	6										
20°C	Largeur à rue	R+1/2	4 Façades	N		Semi-continu homogène, cité sociale		Creux	10	10					10	DVA-DVP-TV	C		Chauffage local
			2 Façades	N-S		20									DVP-TV	D			
			E-O																
		R+1	4 Façades	N		Village, noyau rural	15		15	DVA-DVP-TV	C								
			3 Façades	N-S		30	DVP-TV		D										
			2 Façades	E-O															
20-16°C		R+2	3 Façades	N		Discontinu, lotissement périurbain	20		20	DVA-DVP-TV	C								
			2 Façades	N-S		30	DVP-TV		D										
			E-O																
		R+3	2 Façades	N-S		Rural isolé	25	25	DVA-DVP-TV	C									
				E-O		35	DVP-TV	D											
3		31			262	8	2	8	43				25						

Tableau 21 : Récapitulatif des combinaisons des cas « Appartement » possibles au niveau de l'outil internet

POSSIBILITES DE CHOIX POUR LES APPARTEMENTS																																													
TYPOLOGIE		CLIMAT & ENVIRONNEMENT					PERFORMANCE ENERGETIQUE																																						
Thermostat		Gabarit	Orientation		Commune		Quartier		Mitoyenneté	Isolation dans la dalle	Isolation dans les murs	Isolation dans la toiture	Vitrage	Ventilation	Système de chauffage																														
18°C		Traversant étroit	N-S E-O	262 communes wallonnes		Centre-ville dense	Toiture	Plancher		0	0	SV-DVA-DVP	A		Chauffage central																														
											16																																		
											3					3																													
		6	6																																										
			10							10						DVA-DVP-TV	C																												
										20	20					DVP-TV	D																												
15	15	DVA-DVP-TV			C																																								
	30	30	DVP-TV		D																																								
		25	25		DVA-DVP-TV	C																																							
30			30		DVP-TV	D																																							
	20°C		3 Façades		N					Semi-continu homogène, cité sociale	Village, noyau rural						0	Plancher	SV-DVA-DVP	A		Chauffage local																							
		Discontinu, lotissement périurbain																					Rural isolé	« Grands ensembles » et autres	3	6	10	15	20	25	30														
6							10	15	20					25	30																														
																																10	15	20	25	30									
																									15	20	25	30																	
20							25	30																																					
			25		30																																								
		Mono-façade				N S E O				Première couronne, semi-continu	Discontinu, lotissement périurbain			Rural isolé					0	Plancher			SV-DVA-DVP	A		Chauffage local																			
Façades en coin							N S E O																				« Grands ensembles » et autres				0	Plancher	SV-DVA-DVP	A											
			3		6																														10	15	20	25	30						
																																								6	10	15	20	25	30
	15		20		25							30																																	
		20				25			30																																				
25				30																																									
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													
	30																																												
		30																																											
30																																													

### 5.3. Choix du logiciel de simulation

Le choix s'est posé sur le logiciel dynamique multizone TRNSys qui permet de modéliser et simuler le comportement d'un édifice en implémentant ses systèmes.

Toutefois, afin de faciliter les simulations et de ce fait varier au maximum les typologies traitées de logements, il a été choisi d'utiliser le logiciel dynamique de façon mono-zone ce qui veut dire que l'on teste une seule zone dont le volume équivaut au volume total de l'habitation. On détermine donc le besoin de chauffe de façon globale sans considérer les différentes zones de chauffe d'un logement.

Le logiciel de simulation dynamique TRNSys comporte deux interfaces : TRNBuild et Simulation Studio. Le premier permet de modéliser le bâtiment, soit principalement d'encoder les surfaces, la composition des parois et les vitrages. Le second permet de modéliser les systèmes liés au bâtiment comme la ventilation et les consignes de chauffages ainsi que d'introduire les données climatiques. Finalement c'est ce dernier qui va effectuer la simulation du bâtiment et fournir les résultats.

#### 5.3.1. Présentation et implémentation des paramètres de modélisation dans l'interface TRNBuild

L'interface de TRNBuild se présente comme un dossier à compléter suivant le bâtiment à modéliser. Une fenêtre correspond à chaque zone soit à un volume d'air et en définissant la composition et les surfaces des parois on implémente les conditions de bords de cette zone thermique.

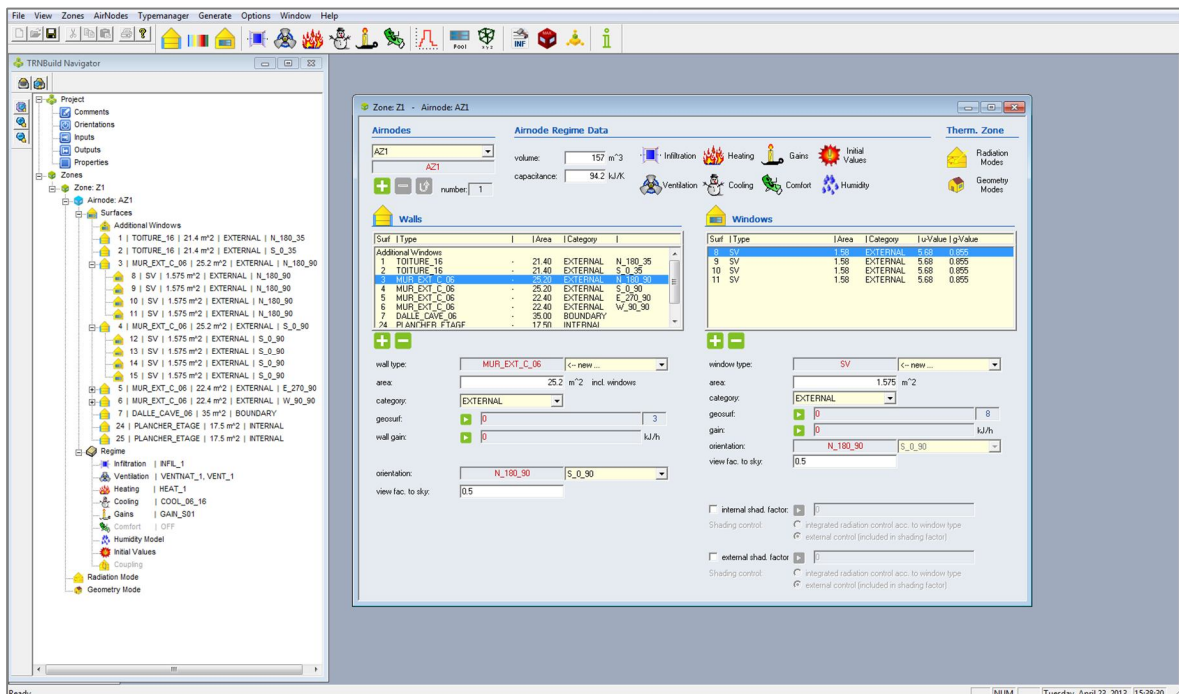


Figure 43 : Interface de TRNBuild

Les données à encoder directement correspondent principalement aux données géométriques et physiques. En effet, pour SOLEN, les données nécessaires à l'implémentation des régimes du bâtiment se fond par des inputs provenant de la



modélisation des systèmes de l'habitation dans le Simulation Studio.

Pour modéliser entièrement l'enveloppe du bâtiment, quatre interfaces sont complétées. Une pour les matériaux, une pour la composition des parois, une pour les fenêtres et vitrages et une pour encoder les surfaces définissant la zone thermique. On retrouve ci-après ces quatre interfaces plus en détails.

- **INTERFACE « LAYERS »** : On y encode la liste des matériaux entrant dans la composition des parois ainsi que leurs caractéristiques physiques à savoir leur conductivité thermique, leur capacité thermique et leur densité.
- **INTERFACE « WALLS »** : Cette fenêtre permet de créer l'ensemble des parois nécessaires à la modélisation. On y définit pour chacune le nombre de couche avec le matériau et l'épaisseur correspondant comme nous l'avons explicité plus haut de manière à définir l'ensemble des compositions de parois, avec variations d'isolation, disponible sur le site.

Au moment de définir les parois, le logiciel donne uniquement une valeur indicative du coefficient thermique U de la paroi modélisée. En effet, il prend par défaut les conditions d'une paroi verticale entre un climat intérieur et extérieur pour calculer le U donné. Il ne tient donc pas compte de réelles conditions extérieures que la paroi pourrait avoir.

Le vrai coefficient qui est utilisé par le logiciel est recalculé lorsque les conditions de la paroi sont indiquées mais celui-ci n'est pas communiqué ce qui ne nous permet pas de le comparer avec le coefficient de transmission thermique U calculé plus haut suivant la méthode PEB lorsque nous avons défini la composition des parois de l'enveloppe extérieure.

Néanmoins, il est à noter que les résistances thermiques d'échange superficiel d'une paroi  $R_{si}$  et  $R_{se}$  prennent les mêmes valeurs au niveau du logiciel que dans la réglementation PEB suivant les catégories de parois. On peut donc se fier au fait qu'il s'agit de valeurs identiques ou très proche à celles calculées manuellement plus haut.

- **INTERFACE « WINDOWS »** : Le choix du vitrage se fait grâce à une bibliothèque incluse. Nous avons donc précisé les coefficients de transmission thermique U utilisé dans la modélisation des fenêtres du logement.

*Tableau 22 : Coefficient de transmission thermique  $U_g$  des vitrages implémentés dans TRNBuild*

Vitrages	Simple vitrage	Double vitrage ancien	Vitrage « PEB »	Double vitrage performant	Triple vitrage
Bibliothèque TRNBuild	Single, 5.8	Insulating, 2.8	Saint Gobain CLIMAPLUS FUTUR AR	Saint Gobain PLANISOL Neutral	Saint Gobain CLIMATOP FUTUR AR
Design	4	4/16/4	4/15/4	6/16/6	4/16/4/16/4
<b>Coefficient de transmission thermique <math>U_g</math> [W/m²K]</b>	<b>5,8</b>	<b>2,83</b>	<b>1,43</b>	<b>1,05</b>	<b>0,59</b>

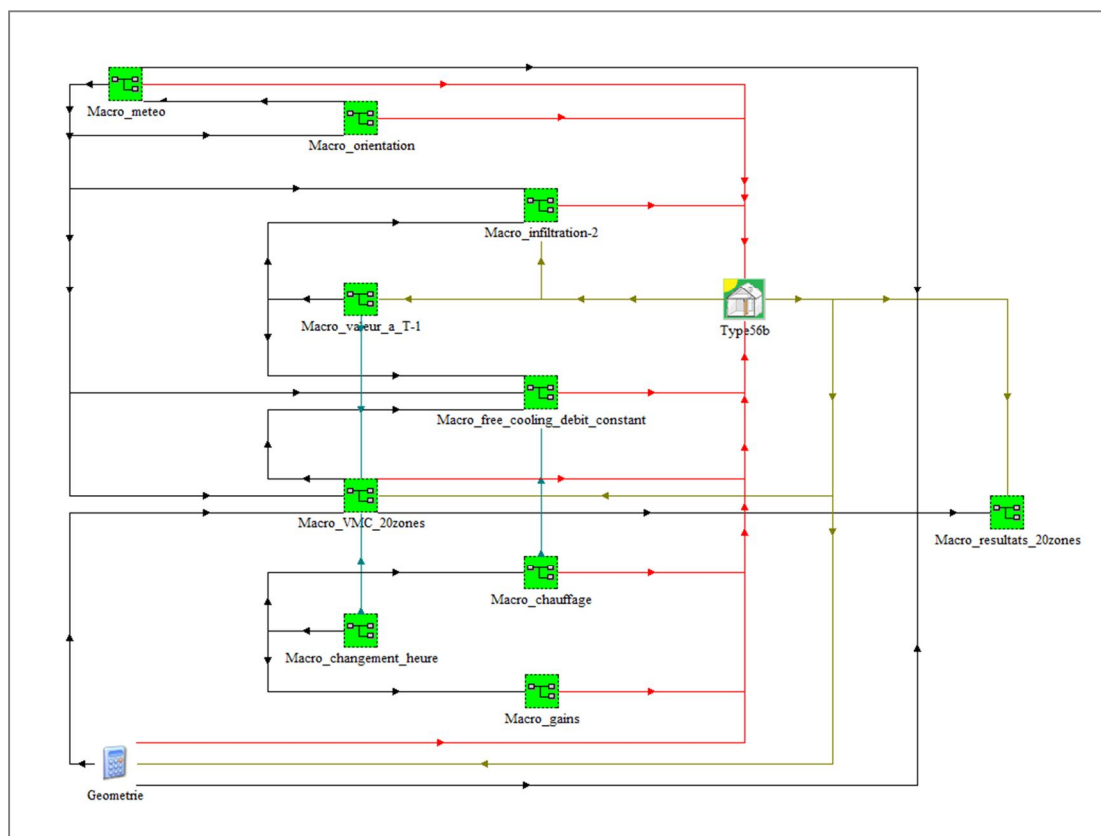
- **INTERFACE « ZONE / AIRNODE »** : C'est dans cette fenêtre que l'on va réellement implémenter le bâtiment. On crée autant de surface qu'il n'y a de paroi délimitant la zone thermique étudiée. Et pour chaque surface on définit en premier son type de paroi en faisant référence aux murs définis avant et son aire.

Ensuite on précise sa catégorie soit s'il s'agit d'un mur interne à la zone, d'un mur externe donc limites avec l'environnement extérieure, d'un mur adjacent avec une autre zone ou d'un mur mitoyen donc en contact avec un climat intérieur mais qui n'appartient pas au bâtiment modélisé et simulés. On détermine ainsi s'il s'agit d'une maison mitoyenne, semi-mitoyenne ou isolée ou un appartement traversant, 3 façades, mono-façade ou avec les façades en coin.

Dans le cas de murs externes on peut également définir des fenêtres en choisissant le type de vitrage et en encodant sa surface. Finalement on encodera l'orientation, azimut et inclinaison, de la surface implémentée.

### **5.3.2. Présentation, implémentation des paramètres de modélisation et calibrage de l'interface Simulation Studio**

L'interface de Simulation Studio est composé de boîtes appelées « Macro ». Elles correspondent à des boîtes de calculs et de traitements de données. Chaque boîte reçoit donc des inputs d'une autre Macro ou d'un fichier externe et renvoie des outputs vers une autre Macro ou un fichier externe. Les données transitent d'une Macro à l'autre par des liens réalisés sous forme de flèche à sens unique. Le bâtiment testé correspond à une Macro et les autres permettent d'implémenter les systèmes du logement principalement.



*Figure 44 : Interface de Simulation Studio*

Nous allons maintenant exposer l'ensemble des données à encoder dans le logiciel TRNSys Simulation Studio de manière à modéliser les systèmes du logement et le climat extérieur suivant les paramètres et leurs variations voulues au niveau de l'outil internet.

### Macro Météo

- **LE FICHIER METEO** est le seul élément à rentrer dans la Macro Météo. Les données du fichier climat de base correspondent à une année « météonorm » à Uccle. Ce fichier est donc fixe. Pour rendre compte de la variation de climat au sein de la Wallonie commune par commune on appliquera un coefficient au besoin de chauffage basé sur la différence des degrés-jour en base normalisée 15/15 de la commune considérée et ceux d'Uccle.

### Macro Infiltration

- **L'EXPOSITION AU VENT DU BATIMENT** : Ce coefficient peut varier entre 1 soit peu exposé au vent et 2 soit fort exposé au vent. Le choix doit donc être idéalement fonction de la mitoyenneté, du quartier et de la région. Mais ces deux derniers paramètres n'interviennent pas dans les simulations et la mitoyenneté est implémentée dans le TRNBuild. En outre, on remarque que des valeurs extrêmes par rapport à une valeur médiane donne un besoin de chauffe augmenté ou diminué d'à peu près seulement 1% par rapport au besoin de chauffe du cas médian. Dès lors comme ce coefficient a peu d'impact, il a été décidé de mettre la valeur médiane de 1.5 pour l'exposition au vent.

*Tableau 23 : Impact de l'exposition au vent sur le besoin net de chauffe annuel d'une maison 4 façades de 70 m<sup>2</sup> avec une isolation 6-6-16 cm (dalle-mur-toiture) et du simple vitrage*

Exposition au vent	Besoin de chauffe [kwh]	Besoin de chauffe normalisé [%]
1	12799.42	98.8 %
1.5	12950.03	100 %
2	13087.68	101.1 %

- **LA VALEUR D'ÉTANCHEITE n50** : L'étanchéité d'un bâtiment est fonction de la qualité des joints de fenêtres ainsi que de la composition des parois mais également du type de logement. Le niveau d'étanchéité du bâtiment est responsable de pertes d'énergie par infiltration et de risque de courants d'air.  
Ainsi la valeur d'étanchéité normalisée n50 exprimée en volume par heure par volume représente le taux horaire de renouvellement d'air par infiltration des parois de l'habitation pour laquelle on applique une différence de surpression de 50 Pa entre l'intérieur et l'extérieur. Il s'agit donc d'une valeur normalement mesurée in situ. Et comme nous modélisons des maisons fictives, cette mesure ne peut être réalisée. Néanmoins nous pourrions fixer la valeur d'étanchéité suivant le type de vitrage, soit son coefficient de transmission thermique, et la mitoyenneté du logement et ainsi rendre compte de l'étanchéité de l'enveloppe.  
Toutefois, la valeur d'étanchéité n50 est également importante quant à la performance du système de ventilation. Ainsi on préconise souvent 12 m<sup>3</sup>/h.m<sup>3</sup> pour

une ventilation A, 6 m<sup>3</sup>/h.m<sup>3</sup> pour une ventilation C et maximum 1 m<sup>3</sup>/h.m<sup>3</sup> pour une ventilation D (Evrard et al., 2012). Nous avons finalement retenu cette dernière option.

#### Macro Ventilation naturelle

- **LA TEMPERATURE A LAQUELLE ON COMMENCE LE FREE COOLING** soit la température à laquelle on considère la fenêtre ouverte est fixée à 25°C.
- **LA TEMPERATURE D'ARRET** de la ventilation naturelle au contraire est fixée à 23°C. L'occupant referme la fenêtre.

#### Macro Ventilation mécanique contrôlée

- **HORAIRE JOURNALIER DE FONCTIONNEMENT DES VENTILATEURS** : Il faut déterminer l'allumage et la fermeture des ventilateurs la semaine et le weekend. On considère soit une position ouverte ON soit une position fermée OFF peu importe l'heure. Cette position ON/OFF fixe est donc fonction du type de ventilation : soit OFF pour une ventilation A, car pas de ventilation mécanique, et ON pour les types C et D.

- **LES DEBITS VOLUMIQUES PULSE ET EXTRAIT** : Comme nous simulons en mono-zone et qu'il n'est par conséquent pas possible de rendre compte de la ventilation (pulsion et/ou extraction) dans chaque pièce, on suivra la norme belge NBN D 50-001 "Dispositifs de ventilation dans les bâtiments d'habitation" (IBN, 1991) pour déterminer les débits. Celle-ci préconise un renouvellement d'air de 36 m<sup>3</sup>/h par personne pour assurer un confort respiratoire.

Le débit pulsé est donc fonction du nombre d'occupant. Comme celui-ci n'est pas pris directement en compte lors des simulations et ne peut être déduit logiquement du gabarit du logement, on envisage par défaut une famille comprenant 4 personnes pour les maisons et de 3 personnes pour les appartements.

Dans le cas d'une ventilation double flux avec récupérateur de chaleur type D, le débit de pulsion sera donc fixé à 144 m<sup>3</sup>/h et donc celui d'extraction également à 144 m<sup>3</sup>/h pour une maison et pour un appartement les débits seront de même de 108 m<sup>3</sup>/h.

Dans le cas d'une ventilation de type C, on considère l'allumage des ventilateurs d'extraction uniquement dans les locaux d'air viciés c'est à dire au niveau de la cuisine (par la hotte), des toilettes et de la salle de bains. En se référant à nouveau aux débits définis dans la norme belge (75 m<sup>3</sup>/h pour la cuisine, 50 m<sup>3</sup>/h pour la salle de bain et 25 m<sup>3</sup>/h pour les toilettes) et suivant un comportement type d'une famille (1h de cuisson par jour, 2h dans la salle de bain et trois quarts d'heure aux toilettes) on peut estimer que les ventilateurs ont un débit moyen constant de 8 m<sup>3</sup>/h sur une journée.

- **LES RENDEMENTS EN TEMPERATURE ET HUMIDITE** expriment la capacité de récupération de chaleur et d'humidité par la ventilation double flux en pourcent. Pour l'humidité, le rendement sera toujours nul car il n'y a jamais de récupération d'humidité dans notre cas. De même, si le rendement en température est égal à 0 il s'agit bien alors d'une ventilation A ou C sans récupération de chaleur. Dans le cas d'une ventilation double flux avec récupérateur de chaleur, ventilation D, le rendement en température sera alors fonction du ventilateur et est fixé à 85%.

- **LA RECUPERATION DES CONSOMMATIONS DU VENTILATEUR** comme gain sur la température de l'air pulsé doit être activée de manière à rendre compte du gain de chaleur interne supplémentaire fourni par le fonctionnement du ou des ventilateurs de pulsions.
- **LE PRECHAUFFAGE** par batteries de chauffe de l'air pulsé n'est jamais activé dans notre cas, peu importe le système de ventilation considéré. L'utilisation de batteries de chauffe et donc la ventilation fait office de système de chauffage est un cas qui sera envisagé, si le temps le permet, une fois que les premières simulations seront terminées.

### Macro Chauffage

- **LA PERIODE DE CHAUFFE ANNUELLE** : On choisit un horaire de consigne de chauffe hebdomadaire identique peu importe la saison. En effet, on choisit que seul l'horaire journalier de chauffe détermine le fonctionnement du système de chauffe durant l'année. On aura donc une position ON pour chaque heure de l'année.
- **L'HORAIRE JOURNALIER DE CONSIGNE DE CHAUFFE** de la semaine et du weekend sont fonction du thermostat voulu. Pour les consignes de 18 et 20°C, la température est constante tout au long de la journée en semaine et le weekend. Dans le cas du thermostat 20/16°C, l'horaire permet de rendre compte des heures de nuits et de travail de façon différente en semaine et le weekend.

### Macro Orientation

- **LA ROTATION DE LA COURSE DU SOLEIL** : L'orientation de base est entrée dans l'interface TRNBuild mais pour paramétrer facilement celle-ci, la Macro Orientation permet de faire tourner le soleil. Soit de définir à quel point cardinal de l'habitation modélisée il se lève. On fait ainsi tourner le soleil, soit la quantité d'ensoleillement reçu par façade, et non la maison. Par défaut on modélise le Nord sur la façade à rue. Donc pour mettre celle-ci à l'Est on donnera un angle de rotation de 90°, pour le Sud de 180° et pour l'Ouest de 270°.

### Macro Résultats

- **LE FICHIER RESULTATS** va être généré sous format texte ouvrable avec Excel. Les données demandées sont le besoin de chauffe, la chaleur récupérée par la ventilation double flux au niveau de l'échangeur à plaques, la chaleur due au fonctionnement des ventilateurs et finalement les gains solaires au travers des fenêtres en kilowattheure par mètre carré. Les résultats sont intégrés sur une heure de temps. Le nom du fichier résultat est demandé en fonction de la variation de paramètres testée de manière à en faciliter le traitement.

*Tableau 24 : Récapitulatif des données encodées dans le Simulation Studio pour implémenter les paramètres de modélisation*

Météo			
Fichier météo	meteonorm_uccle_JUL2JUN_heatwav76_coldwave97_20101215.txt		
Infiltration			
Vent	1.5		
n50 [m³/hm³]	Ventilation A	Ventilation C	Ventilation D
	12	6	1
Ventilation naturelle			
T_ON	25°C		
T_OFF	23°C		
Ventilation mécanique contrôlée			
	Type A	Type C	Type D + RC
Horaire	OFF	ON	ON
Débit de P/E [m³/h]	-	8 / 8	144(108) / 144(108)
Rdt en température	-	0	0.85
Gain du ventilateur	-	ON	ON
Préchauffage	-	OFF	OFF
Consignes de chauffe			
Horaire de chauffe	Fonction du thermostat		
Période de chauffe	ON toute l'année		
Orientation			
Rotation [°]	Fonction de l'orientation (0°=Nord; 90°=Est; 180°=Sud; 270°=Ouest)		
Résultats			
Pas de temps	1 heure		
Résultats sortants [kWh/m²]	Besoin de chauffe Chaleur récupérée par la ventilation double flux Chaleur dégagée par le fonctionnement des ventilateurs Gains solaires transmis à travers le vitrage		

## 5.4. Traitement des résultats et mise en œuvre de la base de données « bâtiment »

L'objectif étant de fournir un outil interactif au niveau d'un site, il est nécessaire de traiter les résultats obtenus des simulations de manière à en faire une base de données « bâtiment » opérationnelle. Dans un premier temps nous allons ainsi exposer les étapes nécessaires à sa création soit les différentes étapes de la modélisation au traitement des résultats, ensuite le code utilisé pour nommer chaque cas simulés et testés au niveau du site et pour finir nous nous attarderons sur la validation de la méthodologie d'extrapolation. Dans un deuxième temps, nous reviendrons sur la manière dont elle sera exploitée au niveau du site internet.

### 5.4.1. Création de la base de données

#### 5.4.1.1. Avec le logiciel de simulation TRNSys

Étape 1 : Encoder les différents matériaux et leurs caractéristiques physiques.

Étape 2 : Composer les parois à partir des matériaux encodés en définissant leurs épaisseurs.

Étape 3 : Définir les différents vitrages testés.

Étape 4 : Créer les fichiers de modélisation de base suivant les mitoyennetés du logement.

Étape 5 : Générer l'ensemble des logements testés en croisant typologie et niveau de performance thermique de l'enveloppe.

Étape 6 : Simuler les logements en tenant compte de l'orientation et du thermostat voulu.

#### 5.4.1.2. Dans le tableur Excel

Étape 7 : Traiter et compiler les résultats.

Étape 8 : Mettre en forme la base de données dans Excel.

Étape 9 : Recommencer avec d'autres choix de paramètres pour étoffer la base de données suivant le temps nécessaire.

#### 5.4.1.3. Code des cas simulés

Lors des simulations chaque cas testé est dénommé au moyen d'un code. Ce code marque également le nom du fichier résultat et permettra de retrouver le cas dans la base de données « bâtiment » au niveau de l'outil. Il s'écrit au moyen de 11 items, chiffre ou lettre, comme suit :

CAS = LOGEMENT\_GABARIT\_MITOYEN\_ORIENTATION\_DALLE\_MUR\_TOIT\_VITRAGE\_VENT\_TEMP\_SURFACE

Chaque lettre ou chiffre fait donc directement référence à une variation de paramètre. On retrouve ci-après, dans le Tableau 25, la signification de chaque composant.

Par exemple le cas 1\_5\_2\_2\_a\_a\_f\_2\_1\_3\_2 correspond dans l'ordre à une maison (1), de largeur à rue R+2 (5), 2 façades (2), dont la façade à rue est orientée à l'Est (2), avec 0 cm d'isolant dans la dalle (a), 0 cm d'isolant dans les murs de type plein (a), avec 16 cm d'isolant en toiture (f), du double vitrage ancien (2), une ventilation A (1), avec un thermostat de type 20/16°C (3) et finalement dont la taille simulée est la deuxième (2).

Tableau 25 : Signification des items constituant le code du cas testé

LOGEMENT : type de logement		
1	Maison	
2	Appartement	
GABARIT : type de gabarit suivant le type de logement		
Maison		Appartement
1	Longueur à rue et R+1/2	Traversant étroit
2	Longueur à rue et R+1	Traversant large
3	Largeur à rue et R+1/2	3 façades
4	Largeur à rue et R+1	Mono-façade
5	Largeur à rue et R+2	Façade en coin
6	Largeur à rue et R+3	
MITOYEN : mitoyenneté suivant le type de logement		
Maison		Appartement
1	4 façades	En toiture
2	3 façades	Au milieu
3	2 façades	Au rez-de-chaussée
ORIENTATION : orientation de la façade à rue		
1	Nord	
2	Est	
3	Sud	
4	Ouest	
DALLE : type de « plancher » et épaisseur de son isolant		
a	Dalle de sol avec 0 cm d'isolant	
b	Dalle de sol avec 3 cm d'isolant	
c	Dalle de sol avec 6 cm d'isolant	
d	Dalle de sol avec 10 cm d'isolant	
e	Dalle de sol avec 15 cm d'isolant	
f	Dalle de sol avec 20 cm d'isolant	
g	Dalle de sol avec 25 cm d'isolant	
h	Dalle de sol avec 30 cm d'isolant	
i	Dalle de sol au niveau de performance définie par la réglementation PEB	
j	Plancher d'appartement	



Tableau 25-suite : Signification des items constituant le code du cas testé

MUR : type de « mur » et épaisseur de son isolant	
a	Mur plein avec 0 cm d'isolant
b	Mur plein avec 3 cm d'isolant
c	Mur plein avec 6 cm d'isolant
d	Mur plein avec 10 cm d'isolant
e	Mur plein avec 15 cm d'isolant
f	Mur plein avec 20 cm d'isolant
g	Mur plein avec 25 cm d'isolant
h	Mur plein avec 30 cm d'isolant
i	Mur creux avec 0 cm d'isolant
j	Mur creux avec 3 cm d'isolant
k	Mur creux avec 6 cm d'isolant
l	Mur creux avec 10 cm d'isolant
m	Mur creux avec 15 cm d'isolant
n	Mur creux avec 20 cm d'isolant
o	Mur creux avec 25 cm d'isolant
p	Mur creux avec 30 cm d'isolant
q	Mur au niveau de performance définie par la réglementation PEB
TOIT : type de « toiture » et épaisseur de son isolant	
a	Toiture avec 0 cm d'isolant
b	Toiture avec 3 cm d'isolant
c	Toiture avec 6 cm d'isolant
d	Toiture avec 10 cm d'isolant
e	Toiture avec 15 cm d'isolant
f	Toiture avec 16 cm d'isolant
g	Toiture avec 20 cm d'isolant
h	Toiture avec 25 cm d'isolant
i	Toiture avec 30 cm d'isolant
j	Toiture avec 35 cm d'isolant
k	Toiture au niveau de performance définie par la réglementation PEB
l	Plancher d'appartement
VITRAGE : type de vitrage	
1	Simple vitrage
2	Double vitrage ancien
3	Double vitrage performant
4	Triple vitrage
5	Vitrage au niveau de performance définie par la réglementation PEB

Tableau 25-suite : Signification des items constituant le code du cas testé

VENT : type de système de ventilation	
1	Système A
2	Système C
3	Système D
TEMP : température de consigne	
1	Thermostat à 18°C
2	Thermostat à 20°C
3	Thermostat à 20/16°C
SURFACE : taille de simulation	
1	Surface 1
2	Surface 2
3	Surface 3

#### 5.4.1.4. Extrapolation suivant la taille

Comme nous l'avons spécifié, un panel de taille est disponible au niveau du site internet mais chaque typologie de logement n'est simulée qu'en 3 tailles représentatives du gabarit de l'habitation. Après les simulations on obtient donc pour chaque cas trois résultats fonction des m² testés de l'habitation par exemple si on reprend le cas plus haut, on a :

- 1\_5\_2\_2\_a\_a\_f\_2\_1\_3\_1 qui correspond au cas simulés avec 96 m²
- 1\_5\_2\_2\_a\_a\_f\_2\_1\_3\_2 qui correspond au cas simulés avec 121.5 m²
- 1\_5\_2\_2\_a\_a\_f\_2\_1\_3\_3 qui correspond au cas simulés avec 150 m²

Ces trois résultats permettent de calculer une courbe de tendance linéaire caractérisée par une pente  $m$  et une ordonnée à l'origine  $p$ . Pour chaque cas, suivant les trois tailles simulées, ces deux paramètres sont calculés et se retrouvent dans la base de données. Il sera donc aisé d'obtenir le besoin de chauffe annuel pour un cas et une surface donnée grâce à l'équation :

$$\text{Besoins de chauffe annuel du Cas } i [\text{kwh}] = m_i \cdot \text{Surface du logement } [\text{m}^2] + p_i$$

Et donc grâce à cette méthode de modélisation, de simulation et d'extrapolation, n'importe quelle taille dans un intervalle défini pourra être encodée et testée au niveau de l'outil.

Mais pour pouvoir effectuer cette extrapolation linéaire, il faut vérifier que le besoin de chauffe annuel en kWh suit une progression linéaire suivant la taille du logement considéré. Nous avons donc choisi de simuler les 6 gabarits « maison » en 4 et 2 façades, cf. Tableau 26, et à 5 niveaux de performances énergétiques progressifs, cf.

Tableau 27, pour couvrir la plupart des typologies et des niveaux de performances énergétiques de l'habitation proposés au niveau du l'outil interactif.

**Tableau 26 : Gabarits testés pour valider l'extrapolation**

Typologies de maisons testées pour valider l'extrapolation linéaire	
1_1_1	Gabarit 1 (longueur à rue et R+1/2), 4 façades
1_1_3	Gabarit 1 (longueur à rue et R+1/2), 2 façades
1_2_1	Gabarit 2 (longueur à rue et R+1), 4 façades
1_2_3	Gabarit 2 (longueur à rue et R+1), 2 façades
1_3_1	Gabarit 3 (largeur à rue et R+1/2), 4 façades
1_3_3	Gabarit 3 (largeur à rue et R+1/2), 2 façades
1_4_1	Gabarit 4 (largeur à rue et R+1), 4 façades
1_4_3	Gabarit 4 (largeur à rue et R+1), 2 façades
1_5_3	Gabarit 5 (largeur à rue et R+2), 2 façades
1_6_3	Gabarit 6 (largeur à rue et R+3), 2 façades

**Tableau 27 : Niveaux de performances énergétiques testés pour valider l'extrapolation**

Niveaux de performances testés pour valider l'extrapolation linéaire	
a_a_a_1_1	0 cm dans la dalle et dans le mur plein, 0 cm dans la toiture, SV et ventilation A
b_b_f_2_1	3 cm dans la dalle et dans le mur plein, 16 cm dans la toiture, DVA et ventilation A
i_q_k_5_2	Niveau PEB – cas référent
e_e_e_3_2	15 cm dans la dalle et dans le mur plein, 15 cm dans la toiture, DVP et ventilation C
h_h_j_4_3	30 cm dans la dalle et dans le mur plein, 35 cm dans la toiture et TV et ventilation D

Pour les autres paramètres, nous avons considéré un thermostat de 20°C avec la réduction à 16°C en l'absence des occupants et pendant la nuit et l'orientation de base soit la façade à rue au Nord.

Après analyse des résultats, voir Tableau 28, Figure 45 et suivants, on remarque aisément que le besoin de chauffe déterminé en kWh pour une année complète suit une progression linéaire suivant la surface de logement habitable envisagé et ce peu importe le gabarit ou encore le niveau de performance énergétique étudié.

En effet le coefficient de détermination  $R^2$  est toujours égal à 1. On peut donc calculer le coefficient angulaire  $m$  et l'ordonnée à l'origine  $p$  pour chaque cas. En comparant le besoin de chauffe obtenu par simulation et celui obtenu suite à l'extrapolation, on observe que l'écart reste toujours inférieur à 1% à nouveau peu importe le gabarit ou le niveau de performance énergétique testé.

En conclusion, on peut valider ce système d'extrapolation ce qui permet de réduire la taille de la base de données « bâtiments ». Au lieu d'avoir le nombre de cas possibles fois le nombre de tailles possibles, on n'y retrouvera plus que le  $m$  et le  $p$  pour chaque cas. Cela permet de tester n'importe quelle taille au niveau du site. L'utilisateur pourra entrer n'importe quel nombre entier compris dans un intervalle à déterminer, (par ex. de 25m<sup>2</sup> à 300m<sup>2</sup>) pour couvrir à la fois les petits appartements et les grandes villas en milieu rural.

Tableau 28 : Comparaison des besoins de chauffe suivant la simulation et après l'extrapolation pour une maison de gabarit 1 en 4 façades

Gabarit 1 (longueur à rue et R+1/2), 4 façades								
CAS		Taille [m²]	Besoin de chauffe annuel suivant la simulation [kWh]	m	p	R²	Besoin de chauffe annuel suivant l'extrapolation [kWh]	Ecart
1_1_1	a_a_a_1_1	70	30698	355.5	5849	1	30734	0.12%
		96	40044				39977	0.17%
		126	50611				50642	0.06%
	b_b_f_2_1	70	8346	86.5	2305	1	8361	0.18%
		96	10639				10610	0.27%
		126	13193				13206	0.10%
	i_q_k_5_2	70	4863	52.9	1166	1	4871	0.15%
		96	6261				6247	0.22%
		126	7828				7835	0.08%
	e_e_e_3_2	70	3403	37.9	753	1	3408	0.17%
		96	4406				4395	0.25%
		126	5528				5533	0.09%
	h_h_j_4_3	70	1691	15.4	615	1	1694	0.23%
		96	2103				2096	0.34%
		126	2555				2558	0.13%

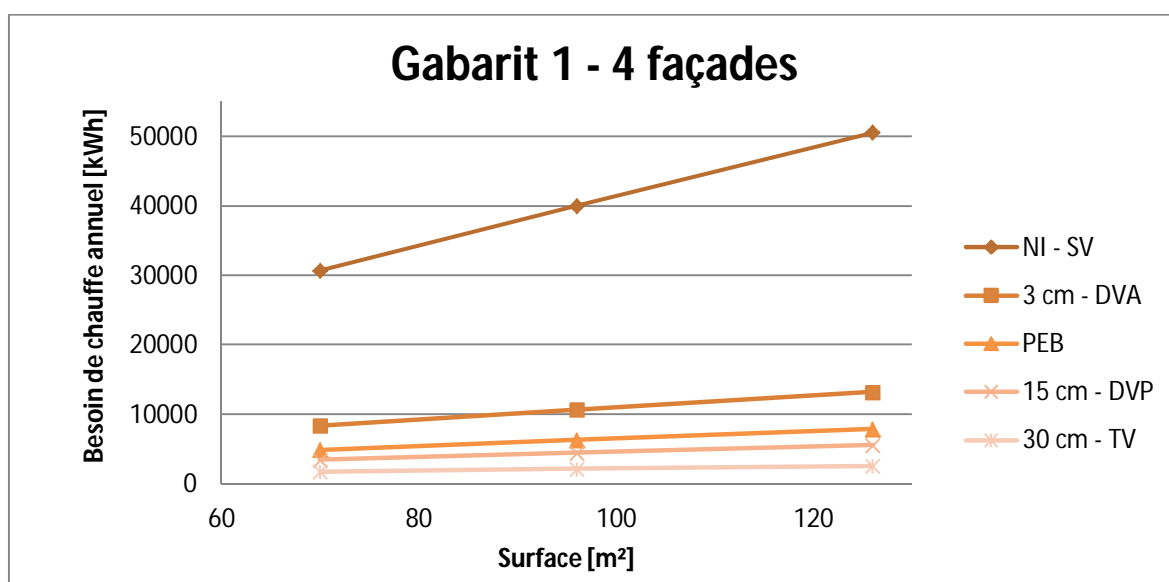


Figure 45 : Variation du besoin de chauffe annuel déterminé par simulation de 3 tailles, en ordonnée [kWh] suivant la surface du logement, en abscisse [m²] pour des niveaux de performances progressifs d'une maison de gabarit 1 en 4 façades

Tableau 29 : Comparaison des besoins de chauffe suivant la simulation et après l'extrapolation pour la maison de gabarit 1 en 2 façades

Gabarit 1 (longueur à rue et R+1/2), 2 façades								
CAS		Taille [m²]	Besoin de chauffe annuel suivant la simulation [kWh]	m	p	R²	Besoin de chauffe annuel suivant l'extrapolation [kWh]	Ecart
1_1_3	a_a_a_1_1	70	21524	258.2	3469	1.000	21540	0.07%
		96	28282				28252	0.11%
		126	35983				35997	0.04%
	b_b_f_2_1	70	4038	39.5	1279	1.000	4046	0.19%
		96	5088				5073	0.29%
		126	6253				6259	0.11%
	i_q_k_5_2	70	2484	26.6	623	1.000	2487	0.13%
		96	3185				3179	0.19%
		126	3975				3978	0.07%
	e_e_e_3_2	70	1701	19.0	376	1.000	1703	0.15%
		96	2201				2196	0.22%
		126	2762				2765	0.08%
	h_h_j_4_3	70	741	5.5	355	1.000	743	0.22%
		96	889				886	0.34%
		126	1051				1052	0.13%

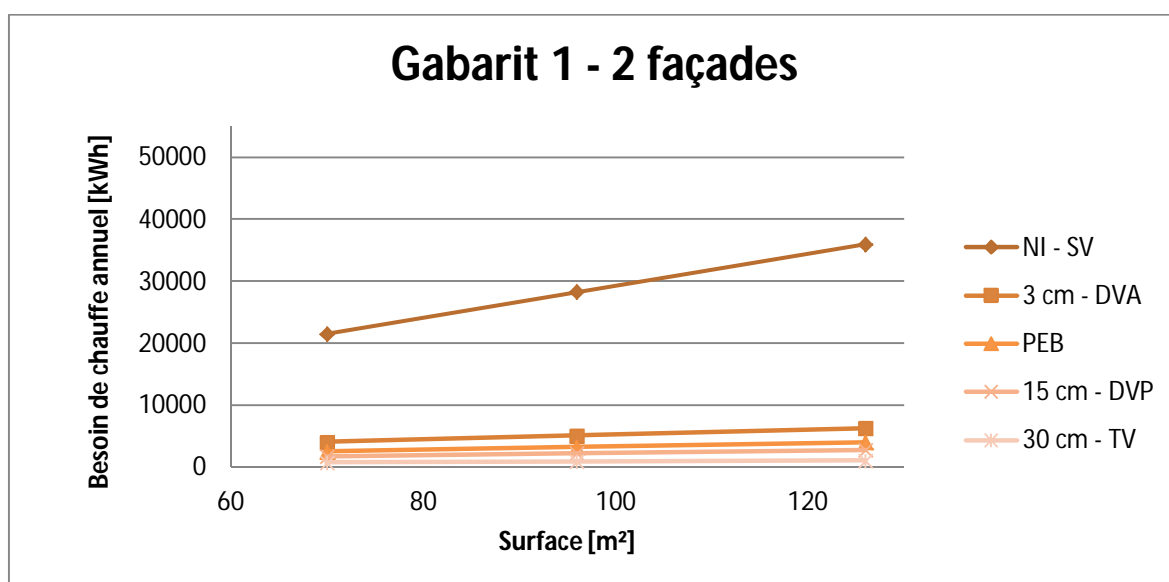


Figure 46 : Variation du besoin de chauffe annuel déterminé par simulation de 3 tailles, en ordonnée [kWh] suivant la surface du logement, en abscisse [m²] pour des niveaux de performances progressifs d'une maison de gabarit 1 en 2 façades

Tableau 30 : Comparaison des besoins de chauffe dus à la simulation et après l'extrapolation

CAS		Taille [m²]	Besoin annuel suivant la simulation [kWh]	m	p	Besoin annuel suivant l'extrapolation [kWh]	Ecart moyen
1_2_1	a_a_a_1_1	96	46871	388.8	9590	46915	0.10%
		126	58661			58579	
		160	71759			71798	
	b_b_f_2_1	96	13889	103.3	3989	13907	0.14%
		126	17041			17007	
		160	20504			20520	
	i_q_k_5_2	96	7990	62.2	2031	7999	0.12%
		126	9882			9864	
		160	11970			11978	
	e_e_e_3_2	96	5664	44.5	1398	5671	0.13%
		126	7020			7007	
		160	8514			8520	
	h_h_j_4_3	96	2756	18.5	981	2760	0.17%
		126	3324			3316	
		160	3943			3946	
1_2_3	a_a_a_1_1	96	31957	274.6	5613	31977	0.06%
		126	40252			40215	
		160	49535			49552	
	b_b_f_2_1	96	6793	47.6	2228	6802	0.14%
		126	8248			8231	
		160	9843			9851	
	i_q_k_5_2	96	4091	31.1	1109	4095	0.10%
		126	5036			5028	
		160	6082			6086	
	e_e_e_3_2	96	2861	22.2	735	2864	0.12%
		126	3536			3530	
		160	4281			4284	
	h_h_j_4_3	96	1206	6.9	550	1208	0.18%
		126	1418			1414	
		160	1646			1647	
1_3_1	a_a_a_1_1	52	25864	426.7	3700	25888	0.09%
		72	34466			34421	
		95	44215			44235	
	b_b_f_2_1	52	7613	121.0	1329	7623	0.12%
		72	10062			10044	
		95	12819			12828	
	i_q_k_5_2	52	4399	71.9	665	4404	0.10%
		72	5851			584	
		95	7492			7496	
	e_e_e_3_2	52	3067	51.7	381	3070	0.10%
		72	4110			4104	
		95	5291			5293	
	h_h_j_4_3	52	1628	23.5	407	1631	0.18%
		72	2107			2102	
		95	2640			2643	
1_3_3	a_a_a_1_1	52	14415	246.4	1602	14417	0.01%
		72	19348			19345	
		95	25012			25013	
	b_b_f_2_1	52	2277	35.2	445	2277	0.00%
		72	2981			2981	
		95	3791			3791	
	i_q_k_5_2	52	1452	24.4	182	1451	0.06%
		72	1937			1939	
		95	2501			2500	
	e_e_e_3_2	52	949	17.1	61	948	0.06%
		72	1288			1289	
		95	1682			1681	
	h_h_j_4_3	52	423	4.6	186	423	0.04%
		72	515			515	
		95	619			620	

Tableau 30-suite : Comparaison des besoins de chauffe dus à la simulation et après l'extrapolation

CAS		Taille [m²]	Besoin annuel suivant la simulation [kWh]	m	p	Besoin annuel suivant l'extrapolation [kWh]	Ecart moyen
1_4_1	a_a_a_1_1	72 95 121	40385 51189 63277	467.1	6773	40406 51150 63295	0.05%
	b_b_f_2_1	72 95 121	12894 16166 19824	141.4	2720	12901 16153 19830	0.05%
	i_q_k_5_2	72 95 121	7362 9283 11431	83.0	1389	7366 9276 11434	0.05%
	e_e_e_3_2	72 95 121	5209 6586 8130	59.6	919	5211 6582 8132	0.04%
	h_h_j_4_3	72 95 121	2695 3336 4042	27.5	721	2699 3330 4044	0.12%
1_4_3	a_a_a_1_1	72 95 121	21520 27475 34251	259.8	2804	21512 27489 34244	0.03%
	b_b_f_2_1	72 95 121	4015 4993 6109	42.7	936	4013 4996 6107	0.04%
	i_q_k_5_2	72 95 121	2481 3136 3886	28.7	416	2480 3139 3885	0.06%
	e_e_e_3_2	72 95 121	1679 2139 2663	20.1	232	1678 2140 2663	0.04%
	h_h_j_4_3	72 95 121	700 833 983	5.8	286	700 833 983	0.01%
1_5_3	a_a_a_1_1	96 121.5 150	25399 31135 37446	223.1	4002	25416 31104 37461	0.07%
	b_b_f_2_1	96 121.5 150	5890 7083 8372	46.0	1485	5897 7069 8379	0.14%
	i_q_k_5_2	96 121.5 150	3427 4153 4944	28.1	734	3430 4147 4947	0.10%
	e_e_e_3_2	96 121.5 150	2330 2833 3378	19.4	470	2333 2828 3381	0.13%
	h_h_j_4_3	96 121.5 150	994 1145 1305	5.8	443	996 1142 1307	0.18%
1_6_3	a_a_a_1_1	128 162 200	31445 38193 45574	196.2	6359	31472 38143 45598	0.09%
	b_b_f_2_1	128 162 200	8350 9933 11629	45.5	2534	8362 9910 11640	0.16%
	i_q_k_5_2	128 162 200	4686 5605 6598	26.6	1292	4691 5594 6604	0.13%
	e_e_e_3_2	128 162 200	3200 3827 4501	18.1	891	3204 3819 4505	0.15%
	h_h_j_4_3	128 162 200	1350 1536 1728	5.2	682	1353 1531 1730	0.21%

#### **5.4.2. Exploitation de la base de données**

Pour conclure cette approche méthodologique de modélisation et simulation afin de créer la base de données « bâtiment », nous allons faire un premier pas plus loin de manière à envisager sa mise en forme et son exploitation au niveau de l'outil internet.

Ainsi, le site internet sur lequel l'utilisateur pourra évaluer son logement ou son quartier devra contenir une ou plusieurs bases de données. En effet, on part du principe que la multiplication du besoins de chauffe par les coefficients applicatifs ayant trait au climat (commune), au quartier et au système de chauffe se fera au niveau du site sur le moment même tout comme la prise en compte de la taille du logement. Cela permet de limiter la base de données « bâtiment » et donc d'accélérer le temps de recherche du cas testés.

La base de données « bâtiment » se présentera donc comme suit : elle prendra la forme d'un tableur dont la première colonne reprendra la liste des cas possibles sous la forme du code à chiffres et lettres que nous avons explicité plus avant. La deuxième colonne reprendra le coefficient  $m$  et la troisième le coefficient  $p$  permettant de définir le besoin de chauffe. Les colonnes suivantes détermineront les consommations liées à la ventilation.

Le déroulement du questionnaire et l'ordre des choix de paramètres, se fera de la même manière que dans le projet SAFE c'est-à-dire que l'on retrouvera des questions relative à la situation géographique, commune et quartier, au début de l'évaluation pour que ces choix soit communs à l'évaluation transport et logement. Ensuite l'évaluation du logement se fera en deux temps de manière à ne pas multiplier les pages de choix et ainsi ne pas lasser l'utilisateur. On retrouvera dans un premier temps les choix à faire quant à la typologie de l'habitation : type de logement, gabarit, taille, mitoyenneté, orientation et année de construction ou performance. Ainsi la performance énergétique du bâtiment est estimée pour la page suivante. Et dans un deuxième temps l'utilisateur remplira les questions nécessaires à préciser ou établir celle-ci : isolation, vitrage, (ventilation), système de chauffe et thermostat.

Lorsque l'utilisateur rempli l'évaluation, chaque choix de sa part fait correspondre un chiffre ou une lettre qui construit question à question le code du cas qui est testé. Ce code permet de faire référence au paramètre  $m$  qui multiplié par la taille et additionné au paramètre  $p$  correspondant donnera le besoin de chauffe annuel total du logement analysé. Celui-ci est alors précisé au moyen des coefficients applicatifs pour arriver à la consommation totale annuelle d'énergie pour chauffer le logement. Une fois cette dernière divisée par la surface habitable du bâtiment choisi on obtient et présente également la consommation par  $m^2$  à l'utilisateur du site qui teste son logement ou son quartier.



## 6.Phase II : Volet « transport »

### 6.1. Introduction, objectifs et approche adoptée

Dans le projet SAFE, une méthode d'évaluation énergétique des déplacements des occupants d'un bâtiment ou d'un quartier a été développée (voir notamment Marique et Reiter (2010) et Marique et Reiter (2012) pour les détails méthodologiques) puis appliquée, de façon systématique à l'ensemble du territoire wallon (voir Marique et al. (2013a) et Marique et al. (2013b) pour investiguer notamment les liens entre forme urbaine, localisation et consommations énergétiques liées aux déplacements des personnes. L'indice de performance des déplacements (qui quantifie en kWh par personne et par trajet les consommations énergétiques relatives au déplacement d'une personne, selon son lieu de résidence) développé dans ce cadre est mobilisé dans les outils d'évaluation « rapide » et « quartier ». La méthodologie développée est mobilisée dans l'outil d'évaluation détaillée. Ces développements constituent toujours le corps de l'outil SOLEN mais seront enrichis, adaptés et complétés pour améliorer l'outil et répondre à de nouveaux besoins

Dans les sections suivantes, un bref rappel des choix opérés dans l'outil interactif SAFE est donc proposé, pour chacun des trois outils d'évaluation. Des améliorations, compléments et mis à jour sont ensuite proposés, outil par outil. Ces propositions devront faire l'objet d'une validation lors du prochain comité d'accompagnement de la recherche SOLEN (en août 2013).

Cette approche est justifiée par un souci d'efficacité et d'opérationnalité. Il s'agit donc d'abord réaliser les développements nécessaires à la mise à jour et aux compléments de l'outil interactif, puis de les investiguer en profondeur (notamment via de nombreuses variations paramétriques) et de les valoriser dans des publications scientifiques. Cette approche, inverse de celle développée dans SAFE (où les développements scientifiques ont été largement investigués et publiés avant d'être implémentés dans l'outil) est motivée par le délai réduit du projet SOLEN (deux ans) et permettra d'utiliser au mieux les quatre mois dédié au graphisme et aux développements des outils de calculs du site.

### 6.2. Dans l'outil d'évaluation rapide

#### 6.2.1. Dans l'outil SAFE

Dans l'outil SAFE, le formulaire relatif à l'évaluation rapide est extrêmement simplifié de façon à pouvoir dresser une première évaluation énergétique des déplacements des personnes rapidement et sans demander trop de données d'entrée à l'utilisateur. Seules la commune de résidence et l'ancienne commune doivent être complétées dans le formulaire ad hoc. Sur cette base, l'outil SAFE propose une série d'indicateurs (consommation énergétique pour une personne et un déplacement, consommations annuelles pour les déplacements d'un ménage type, distance parcourues et répartition modale) basés sur la méthode et l'indice de performance dont il a été question ci-dessus. Ces indicateurs sont comparés à la moyenne régionale de façon à permettre de situer les

« performances » des choix résidentiels de l'utilisateur dans un contexte plus large. Ces développements ne concernent que deux motifs de transport (le travail et l'école) et sont basés sur des données relativement anciennes (enquête socio-économique de 2001) car c'est la seule base de données complètes qui est disponible.

#### **6.2.2. Compléments proposés dans SOLEN**

Dans le cadre de l'outil SOLEN, les précédents développements sont maintenus à titre indicatif car ils ont l'intérêt de couvrir l'ensemble du territoire wallon de façon uniforme et ainsi de permettre la comparaison de l'impact de différentes localisations résidentielles sur les consommations énergétiques pour les déplacements domicile-travail et domicile-école.

Les compléments apportés dans le cadre de SOLEN consistent principalement à contourner deux limites intrinsèques à la méthodologie utilisée dans l'outil SAFE : seuls les déplacements domicile-travail et domicile-école sont considérés et les données sont relativement anciennes.

Dans la version mise à jour de l'outil, le formulaire d'évaluation rapide comprendra un champ de plus qui permettra à l'utilisateur de mentionner le nombre de kilomètres parcourus par lui ou l'ensemble de son ménage annuellement et par mode de transport. Ce type de données est facilement connue des utilisateurs (sur base du compteur de la voiture, de distances moyennes, etc.). Sur base de l'application de la méthode SAFE, il sera alors possible d'obtenir une donnée actualisée des consommations énergétiques des déplacements de l'utilisateur ou de son ménage pour l'ensemble de leurs motifs de déplacements.

L'indice de performance tel qu'introduit dans SAFE et calculé, secteur statistique par secteur statistique, sur base des données de l'enquête socio-économique de 2001, sera par ailleurs mis à jour dans le cadre de SOLEN et utilisé à titre comparatif, pour donner, en complément des résultats basés sur les données entrées par l'utilisateur une moyenne régionale et locale (à l'échelle de la commune et/ou de l'ancienne commune de l'utilisateur). Cette mise à jour est réalisée sur base des équations suivantes (pour les déplacements domicile-travail et pour les déplacements scolaires) établies par Marique (2013). Elles permettent de calculer la variation de l'indice de performance en fonction des paramètres explicatifs principaux et ont été établies sur base d'analyses statistiques (régressions multi-variées) des données de l'enquête socio-économique de 2001. Pour effectuer la mise à jour, on postulera que les deux relations liant indice de performance des déplacements et facteurs explicatifs principaux restent constantes dans le temps. Une mise à jour de ces facteurs explicatifs (densité nette de logements, mixité fonctionnelle et emploi à 10 kilomètres pour les déplacements domicile-travail ; densité nette de logements, parts des modes doux et accessibilité scolaire pour les déplacements scolaires) permettra ainsi de mettre à jour les indices de performance des déplacements.

$$(2) \text{ IPE (travail) } = 1,471 - 0,099 * (\ln \text{ densité}) - 0,296 * (\ln \text{ mixité}) - 0,379 * (\ln \text{ emploi } 10\text{km})$$

$$(3) \text{ IPE (école) } = 1,264 + \beta 1 * (\ln \text{ densité}) - 0,498 * (\ln \text{ modes doux}) - 0,008 * (\ln \text{ accessibilité scolaire})$$

## **6.3. Dans l'outil d'évaluation détaillée**

### **6.3.1. Dans l'outil SAFE**

Dans l'outil d'évaluation détaillée, le formulaire relatif au transport est très complet. Il permet à l'utilisateur de renseigner précisément le mode de transport utilisé (jusqu'à deux modes de transport sont paramétrables pour un seul trajet), le covoiturage éventuel, les performances du véhicule, les fréquences de déplacements et les distances parcourues pour les déplacements domicile-travail et domicile-école. Cette évaluation est donc très précise puisqu'entièrement paramétrable.

### **6.3.2. Compléments proposés dans SOLEN**

Dans l'outil SOLEN, cette démarche générale complète et précise est maintenue mais étendue à l'ensemble des motifs de déplacement d'un ménage ou d'un utilisateur, sans devoir obligatoirement spécifier les caractéristiques des trajets, motifs par motif. Cette amélioration permettra notamment de prendre en compte de nouveaux motifs de déplacements (commerces, loisirs, etc.) mais aussi de prendre en compte les « chaînes de déplacements » (combinaison de plusieurs motifs au sein d'un même trajet) de plus en plus nombreuses dans le contexte actuel.

Les indices de performance des déplacements, mis à jour tel que proposé dans la section 6.2.2 seront également proposés en complément des évaluations basées sur les données renseignées par l'utilisateur.

## **6.4. Dans l'outil d'évaluation d'un quartier**

### **6.4.1. Dans l'outil SAFE**

L'évaluation énergétique des déplacements, à l'échelle d'un quartier, est basée, dans l'outil SAFE sur les mêmes méthodes et procédures que dans l'outil d'évaluation rapide. Les résultats individuels sont agrégés à l'échelle du quartier, en fonction du nombre de travailleurs et du nombre d'écoliers. Cette évaluation présente donc les mêmes avantages et les mêmes inconvénients que ceux rappelés dans la section 6.2.1.

### **6.4.2. Compléments proposés dans SOLEN**

L'approche adoptée dans SOLEN pour l'évaluation énergétique des déplacements à l'échelle d'un quartier diffère assez nettement de celle proposée dans SAFE et lui est fortement complémentaire. En plus de l'actualisation des indices de performance, selon les modalités présentées ci-dessus, il nous semble, en effet, opportun de travailler également sur base de la notion d'« accessibilité », dans une démarche plus prospective qui permettra notamment d'évaluer et de comparer les avantages de différents sites en termes d'accessibilité, et donc en termes de parts modales attendues et de distances parcourues, considérant par exemple qu'un bon indice de mixité fonctionnelle dans un rayon limité autour des limites d'un site encourage un recours accru aux modes doux et des distances à parcourir plus faibles.

Les indicateurs qui sont considérés dans cette approche sont :

- L'accessibilité à une gare : en cohérence avec le référentiel « quartiers durables » développé par Marique et al. (2013d) pour le Ministre wallon de l'Environnement, de l'Aménagement du Territoire et de la Mobilité, l'accessibilité à une gare est mesurée en fonction de la proximité entre le quartier à la gare, modulée par l'importance et la fréquence de desserte de la gare. Trois classes d'accessibilité en train sont identifiées. Dans la première, sont considérés les quartiers (ou les pixels de 10 mètres sur 10) situés à moins de 2.000 mètres d'une gare IC ou à moins de 1.000 mètres d'une gare locale. Dans la seconde classe de densité, sont considérés les quartiers (ou les pixels de 10 mètres sur 10) situés à une distance comprise entre 2.000 et 5.000 mètres d'une gare IC ou entre 3.000 et 1.000 mètres d'une gare locale. La troisième classe d'accessibilité comprend les quartiers (ou pixels de 10 mètres sur 10) situés à une distance plus importante des gares.

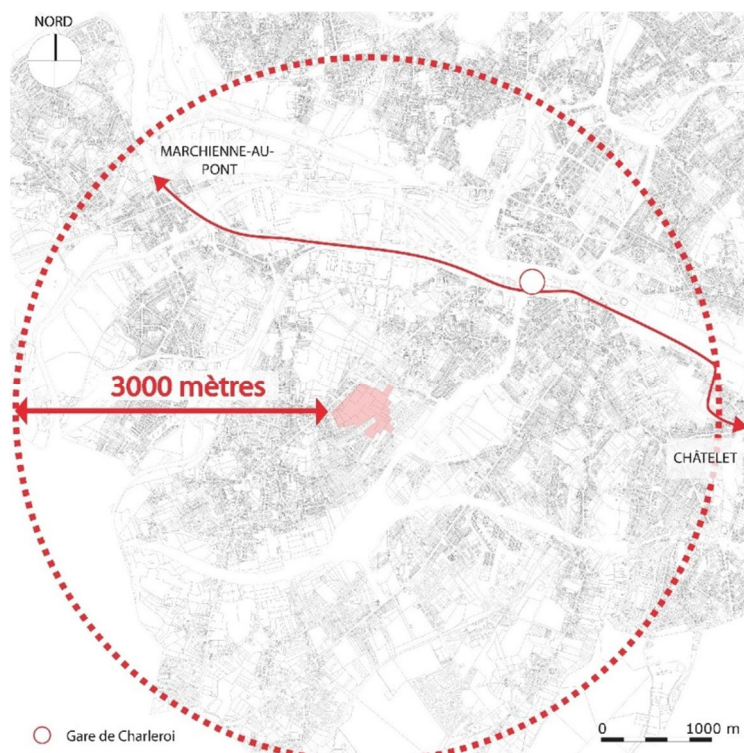


Figure 47 : Accessibilité à la gare, selon le référentiel « quartiers durables » (Marique et al, 2013)

- L'accessibilité aux bus, tram et métro provient également du référentiel « quartiers durables ». Elle dépend de la fréquence de desserte dans un périmètre limité autour des limites du (nouveau quartier). La classe d'accessibilité 1 comprend les quartiers (ou pixels de 10 mètres sur 10) autour desquels, dans un périmètre de 600 mètres, on trouve une desserte en bus minimale journalière (jour ouvrable) de 34 passages (les deux sens confondus). La classe d'accessibilité 2 comprend les quartiers (ou pixels de 10 mètres sur 10) autour desquels, dans un périmètre de 600 mètres, on trouve une desserte en bus minimale journalière (jour ouvrable) de 16 passages (les deux sens confondus). La classe d'accessibilité 3 comprend les quartiers (ou pixels de 10 mètres sur 10 mètres), autour desquels, dans un périmètre

de 600 mètres, la desserte en bus est inférieure à 16 passages par jour.

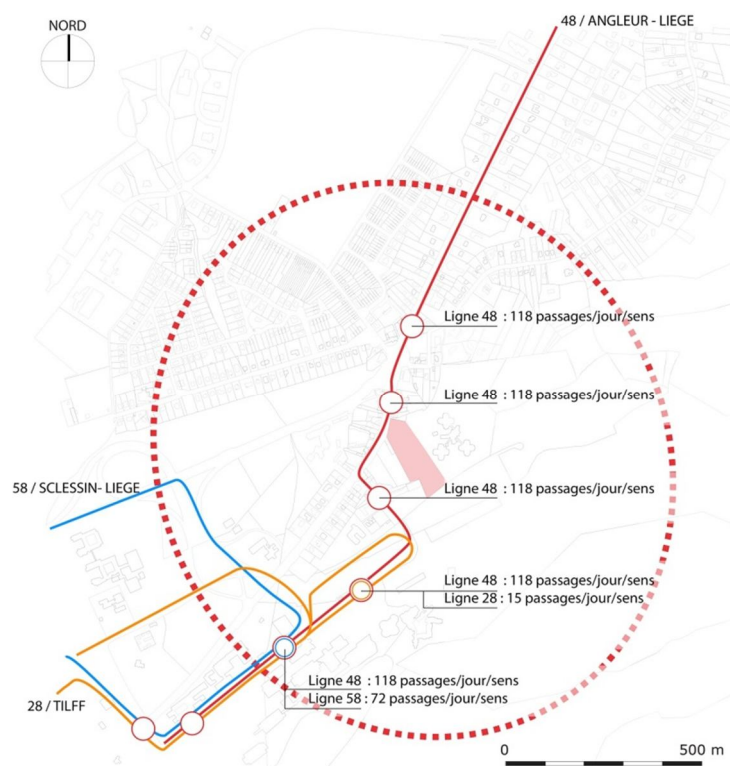


Figure 48 : Accessibilité en bus, tram et métro, selon le référentiel « quartiers durables » (Marique et al. 2013)

- Le relief est un élément important à considérer en ce qui concerne la part attendue des modes doux. Pour évaluer cet indicateur, nous nous baserons sur les travaux de Jean-Marc Lambotte pour la Conférence Permanente du Développement Territorial (voir notamment <http://cartocit1.wallonie.be/cpdt/#>). Qui ont développés des cartes d'accessibilité (au lieu de résidence et au lieu de travail) relatives aux modes doux sur l'ensemble du territoire wallon. L'objectif de ces cartes est d'identifier les lieux où il existe une bonne accessibilité par les modes alternatifs à la voiture et de les distinguer de ceux où il existe une forte dépendance à l'égard de celle-ci. L'accessibilité mesurée tient compte de l'offre en bus, en train et de la facilité à se déplacer en vélo et à pieds. Parmi les hypothèses utilisées pour ce qui concerne les modes doux, la densité de population et une fonction basée sur la probabilité de se déplacer uniquement à pied ou à vélo, en fonction notamment de la distance et du relief, sont utilisées. C'est cette fonction qui sera utilisée ici et définira trois classes principales d'accessibilité piétonne et vélos.
- La mixité fonctionnelle est un indicateur qui a un pouvoir explicatif très fort sur la variation des consommations énergétiques pour les déplacements et de leurs caractéristiques (distances, par modales) comme mis en évidence pour la Wallonie, par Marique (2013). La mixité fonctionnelle est appréhendée ici sur base des travaux de Dujardin et al. (2010). Elle est définie, sur des pixels de 10 \* 10 mètres, sur base de la cartographie de l'occupation du sol wallon (COSW) et pondéré selon la proximité entre les activités. 45 classes de mixité fonctionnelle, de

la plus faible à la plus élevée sont ainsi identifiables. Ces classes seront agrégées en 5 classes principales de mixité fonctionnelle.

- La densité nette de logements (nombre d'habitants par hectare urbanisé) est également un facteur explicatif fort de la variation des comportements et des consommations énergétiques pour les déplacements des personnes. Elle est calculée sur base du PLI et des données INS. Les dix classes de densité proposées dans le cadre de la définition d'une typologie des quartiers sont agrégées en 7 classes principales (voir chapitre 3.2).

La combinaison de ces indicateurs et de leurs classes principales (moyennant modifications éventuelles proposée lors de prochain comité d'accompagnement) donne lieu à l'identification de  $(3 * 3 * 3 * 5 * 7) = 945$  valeurs représentatives de l'accessibilité globale, selon les 5 indicateurs considérés. Ces 945 classes seront ultérieurement agrégées en un nombre plus restreint de classes principales d'accessibilité, de façon à faciliter la représentation graphique et l'interprétation des résultats. De cette façon, chaque carré de 10 pixels sur 10 du territoire wallon sera caractérisé par une valeur qui permettra de quantifier son accessibilité globale (train + bus + modes doux + mixité + densité) et de la comparer à d'autres portions du territoire.

## 7.Phase II : Volet « énergies renouvelables »

### 7.1. Introduction

L'un des principaux apports du projet de recherches SOLEN est d'aborder et de quantifier les potentiels en énergies renouvelables de différents types, à l'échelle du bâtiment et à l'échelle du quartier. L'approche « énergies renouvelables » poursuit un triple objectif :

- Développer des recherches relatives à l'impact de la forme urbaine sur le potentiel en énergies renouvelables de différents types
- Développer une série de fiches pratiques « informatives » qui nourriront la section « fiches pratiques » de l'outil interactif SOLEN et permettront à ses utilisateurs de trouver de nombreuses informations relatives à ces énergies
- Développer des méthodes de quantification et des résultats chiffrés qui pourront être utilisés directement dans les outils d'évaluation de l'outil SOLEN
- Développer un cadre général pour l'étude du « quartier zéro-énergie »

Le présent chapitre aborde essentiellement les travaux et avancées engrangées, en ce qui concerne les trois premiers points. Les deux derniers points font l'objet d'un chapitre séparé (chapitre 8) car ils relèvent d'une approche systémique globale et sont intrinsèquement liés à de nombreuses autres notions abordées dans le cadre de la recherche SOLEN.

### 7.2. Identification du potentiel solaire

#### 7.2.1. Objectifs et logiciel

Les recherches relatives à l'impact de la forme urbaine sur le potentiel en énergies renouvelables se sont essentiellement concentrées sur le potentiel solaire, à l'échelle du quartier. Cet indicateur a, en effet, un impact direct et important sur les besoins en chauffage et en refroidissement d'un bâtiment, sur ses apports en lumière naturel et sur le potentiel valorisables via des systèmes photovoltaïques ou thermiques.

Pour investiguer cet indicateur, les quartiers-types sélectionnés dans le cadre de l'élaboration d'une typologie des quartiers wallons (voir chapitre 3.2) ont été modélisés dans un modeleur tridimensionnel (sketchup) puis exporté au format dxf de façon à pouvoir être importés dans le logiciel Townscope et permettre leur analyse. Le logiciel Townscope a été développé par Teller et Azar (2001), dans le cadre du projet de recherches POLIS. Il s'agit d'un logiciel d'analyse du gisement solaire qui constitue un outil d'aide à la décision en matière de développement urbain durable. Le logiciel permet d'évaluer le rayonnement solaire direct et diffus d'espaces ouverts, sur base de modèles tridimensionnels.

Les calculs effectués dans le logiciel Townscope sont basés sur des projections stéréographiques solaires, réalisées en chacun des points d'études sélectionnés. Ces projections stéréographiques comprennent les tracés des parcours solaires et des heures

solaires et les masques environnants (bâtiments). Il est donc possible d'identifier très rapidement quelles sont les heures potentielles d'ensoleillement en un point et de mesurer l'influence des masques pour différents scénarios. Les valeurs annuelles d'ensoleillement sont obtenues en multipliant, pour chaque mois, les durées d'ensoleillement calculées pour une journée de référence de ce mois par le nombre de jours que compte ce mois et de sommer les résultats obtenus pour les douze mois de l'année. Les valeurs obtenues représentent l'ensoleillement maximum théoriquement enregistrable sous la latitude considérée (Bruxelles) sur les façades, les toitures des bâtiments ou au sol. L'analyse des résultats proposés se fait par comparaison avec une situation de référence (le site vierge ou le quartier en l'état existant), ce qui permet de quantifier la perte effective d'ensoleillement « avant » et « après » intervention. Les résultats obtenus pourraient également être exploités afin de déterminer un potentiel photovoltaïque ou solaire thermique, moyennant un calibrage des données fournies par le logiciel.

Les calculs sont effectués dans l'hypothèse d'un ciel serein (ce qui maximise l'impact des masques considérés). Tous les calculs sont réalisés en heures solaires vraies, ce qui signifie que le soleil est au zénith à midi. L'impact de la végétation n'est pas considéré.

### 7.2.2. Méthode

Trois cents à cinq cents points sont d'abord répartis, de façon aléatoire, sur les façades et les toitures de chacun des quartiers-types modélisés en trois dimensions.

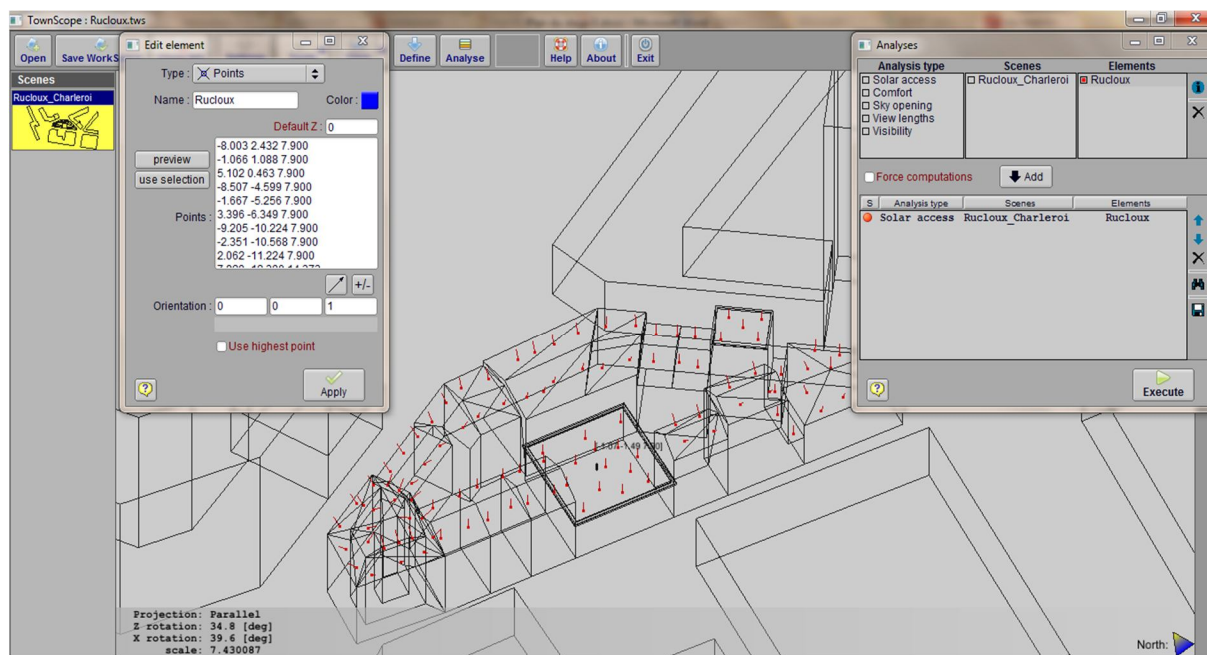


Figure 49 : Répartition aléatoire de 300 à 500 points d'analyse sur les toitures et les façades de chaque quartier-type.

Le gisement solaire est ensuite calculé par le logiciel Townscope, d'abord en site vierge (de façon à fournir une valeur de référence) puis en site urbanisé. La différence entre ces deux valeurs permet de quantifier, pour chacun des points d'analyse et/ou au total sur l'ensemble d'un quartier la perte d'ensoleillement due à l'urbanisation (notamment aux



ombres portées entre les bâtiments, dans les contextes denses, qui empêchent le rayonnement solaire d'atteindre certains points à certaines heures de la journée).

### 7.2.3. Principaux résultats

La figure suivante présente un des résultats principaux des premières simulations qui ont été proposées. Elle quantifie la perte d'ensoleillement relative à quatre jours-types (15 mars, 15 juin, 15 septembre, 15 décembre). La tendance est à la perte d'ensoleillement avec l'augmentation de la densité bâtie, à l'exception des classes 5 et 6, où des configurations morphologiques qui restent peu dense favorisent un accès solaire important.

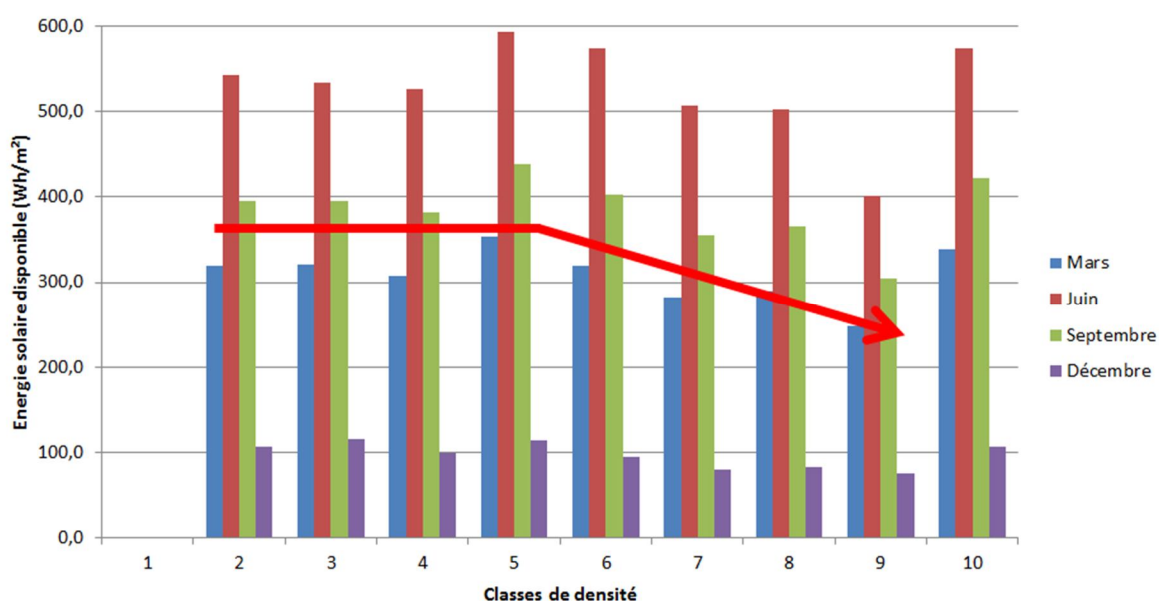


Figure 50 : Perte d'ensoleillement (uniquement en toiture) dans les quartiers-types relatifs des 9 classes de densité supérieure (le calcul n'ayant pas été réalisé dans le quartier de classe 1 qui s'apparente à un bâtiment isolé) pour un jour de référence en mars, en juin, en septembre et en décembre.

### 7.2.4. Valorisation et perspectives

Ces résultats, et ceux obtenus pour les façades des bâtiments des différents quartiers-types, seront directement valorisés dans l'outil interactif SOLEN. Ils vont permettre de définir, pour chaque type de quartier, un facteur d'ombrage caractéristique, à appliquer aux consommations et besoins énergétiques. Ces résultats seront également valorisés, selon la méthode proposée dans le chapitre suivant (sections 8.1.3.1 et 8.1.3.2) dans l'évaluation énergétique du potentiel en énergies solaires photovoltaïque et thermique.

La méthode proposée ci-dessus, les résultats de son application aux quartiers-types et ses principales valorisations feront par ailleurs prochainement l'objet d'un article scientifique.

## 7.3. Avancement concernant les autres types d'énergies renouvelables

D'autres types d'investigations relatives à de nombreux types d'énergies renouvelables

sont en cours d'étude dans le cadre de la recherche SOLEN. Penders (2013) a notamment investigué en profondeur l'intérêt et les potentialités des énergies photovoltaïque, solaire thermique, éolienne, biomasse et cogénération, de façon théorique puis appliquée. Ces enseignements seront ultérieurement capitalisés dans le cadre de la recherche, et notamment mobilisés lors de la rédaction des fiches pratiques qui compléteront l'outil SOLEN.

Remarquons aussi que des méthodes d'évaluation du potentiel en énergies renouvelables de différents types ont été esquissées. Les premières méthodes qui ont été validées sont proposées dans le chapitre suivant, dédié à l'élaboration d'un cadre général pour l'étude des quartiers « zéro-énergie ». D'autres méthodes seront ultérieurement développées pour enrichir et compléter ce cadre général.

Les questions de la centralisation et de la décentralisation, des raccordements aux réseaux et du stockage de l'énergie seront par ailleurs également investiguées dans le cadre de la recherche.

Dix fiches pratiques relatives aux énergies renouvelables, au minimum, seront proposées dans le cadre de l'outil SOLEN et concerneront notamment (1) une présentation générale relative aux énergies renouvelables, (2) le solaire photovoltaïque, (3) le solaire thermique, (4) l'éolien, (5) la biomasse, (6) les pompes à chaleur, (7) la cogénération, (8) la question de la centralisation et de l'échelle d'intervention, (9) le stockage de l'énergie et (10) le raccordement au réseau vs. l'autonomie énergétique.

## 8.Phase II : Cadre général pour l'étude des quartiers « (très) basse énergie » et « zéro énergie ».

### 8.1. Introduction

Ce chapitre vise essentiellement à synthétiser une série de méthodes et indicateurs développés dans le cadre de la première année de recherches SOLEN et présentés dans les premiers chapitres de ce rapport scientifique et technique ainsi qu'à les lier, dans une approche systémique globale définissant le « quartier zéro-énergie ». Ces résultats ont fait l'objet d'un article scientifique, accepté pour présentation orale lors de la prochaine conférence PLEA (Passive and Low Energy Architecture), en septembre 2013, en Allemagne.

### 8.2. Cadre conceptuel général

#### 8.2.1. Introduction

En première approche, le quartier « zéro-énergie » est défini, par analogie avec le bâtiment « zéro-énergie », comme un quartier dans lequel les consommations annuelles d'énergie primaire sont compensées par la production locale d'énergies renouvelables. Conformément aux objectifs de la recherche SOLEN et aux premiers développements proposés dans le cadre de ce rapport (voir notamment la section 2.2.6.2 relative à la définition d'un premier cadre général), les consommations énergétiques considérées ici sont celles relatives au bâtiment et à ses occupants (chauffage, ventilation, refroidissement, auxiliaire, éclairage, cuisson et eau chaude sanitaire) et celles relatives aux déplacements quotidiens des occupants, de façon à prendre en compte, dans la balance, l'impact de la localisation des quartiers sur la génération de mobilité et les consommations énergétiques qui y sont liées. Les sections suivantes présentent, poste par poste, les méthodes d'évaluation énergétique développées pour permettre de dresser un bilan « quartier zéro-énergie ». Ces méthodes sont ensuite appliquées à deux cas d'études représentatifs, un quartier urbain et un quartier périurbain.

#### 8.2.2. Les consommations « bâtiments »

La méthode utilisée pour l'évaluation énergétique des consommations relatives au chauffage et à la ventilation des bâtiments est basée sur les travaux précédents de Marique (2013), Penders (2013) et sur la méthode présentée et utilisée dans le cadre de l'outil interactif SOLEN (voir chapitre 5 du présent rapport). Elle combine une classification typologique des bâtiments résidentiels wallons, des simulations thermiques dynamiques et des traitements statistiques de données provenant des recensements de l'INS pour évaluer les consommations énergétiques annuelles relatives au chauffage des bâtiments ( $E_{SH}$ ), au refroidissement ( $E_{CO}$ ), à la ventilation ( $E_V$ ), aux appareils électriques ( $E_A$ ), à la cuisson ( $E_C$ ) et à l'eau chaude sanitaire ( $E_{HW}$ ). Les consommations énergétiques à l'échelle du quartier sont obtenues par agrégation des résultats individuels au prorata de la répartition de chaque type de bâtiments dans le quartier, moyennant application d'un facteur

d'ombrage, selon le type de quartier dans lequel on se situe. Les hypothèses particulières considérées dans le cadre du projet SOLEN pour le territoire wallon sont présentées dans les sections suivantes.

L'ensemble des consommations évaluées ci-dessous sont converties en énergie primaire dans le bilan final, en appliquant un facteur correctif aux consommations énergétiques. Ce facteur vaut 1 pour les énergies fossiles et le gaz, 2,5 pour l'électricité et 1,8 pour l'électricité hydroélectrique

#### 8.2.2.1. Le chauffage, la ventilation et le refroidissement des bâtiments

Dans le cadre du projet SOLEN, une typologie des bâtiments résidentiels wallons a été établies, en se basant sur la mitoyenneté, la superficie bâtie, le nombre de niveaux, les systèmes de chauffage et de ventilation, l'âge de la construction et les caractéristiques de son enveloppe (voir notamment Marique et Reiter 2012 et Marique 2013 pour de plus amples détails sur cette méthodologie). Trois catégories relatives aux caractéristiques constructives de l'enveloppe des bâtiments sont considérées pour prendre en compte les bâtiments construits selon des standards énergétiques plus ambitieux que l'actuelle Directive PEB. Il s'agit des standards « basse énergie », « très basse énergie » et « passif » pour lesquels les besoins en chauffage sont respectivement limités à 60, 30 et 15 kWh/m<sup>2</sup>.an. De nombreux paramètres peuvent par ailleurs être adaptés pour prendre en compte, par exemple, les éventuels travaux de rénovation entrepris par les ménages (isolation du toit, remplacement des vitrages, changement des systèmes de chauffe et/ou de ventilation, etc.). Les résultats ( $E_{SH}$  et  $E_V$ ) des simulations de très nombreux types de bâtiments (environ 180.000) sont conditionnés dans une large base de données. Dans ces simulations, le climat de Bruxelles est utilisé et un facteur correctif basé sur les degrés jours 15/15 est appliqué pour prendre en compte la localisation du quartier sur le territoire wallon. Les gains internes sont définis en fonction de la superficie habitable du bâtiment.

Le passage des besoins énergétiques aux consommations s'effectue par l'application d'un coefficient qui dépend du type de système de chauffe et de son rendement (Annexe I de la PEB). Les consommations relatives à la ventilation dépendent des caractéristiques de l'enveloppe des bâtiments, selon les modalités présentées dans le chapitre 5.

Les résultats individuels obtenus à l'échelle des bâtiments sont ensuite agrégés à l'échelle du quartier, au prorata de la répartition de chaque type de bâtiments dans le quartier, et moyennant pondération par le facteur d'ombrage caractéristique du quartier.

Les besoins en refroidissement ne sont pas considérés dans notre approche car ils restent faibles en Belgique, au vu du climat tempéré qui y règne.

#### 8.2.2.2. L'eau chaude sanitaire

La consommation annuelle pour l'eau chaude sanitaire est obtenue en multipliant le volume d'eau nécessaire annuellement par l'ensemble des habitants du quartier par la différence en température entre l'eau chaude et l'eau froide et un facteur de conversion de façon à obtenir des kWh. On considère, sur base de moyennes régionales, qu'un

occupant utilise 40 litres d'eau chaude par jour et de 100 litres d'eau froide par jour. Les températures de l'eau chaude et de l'eau froide sont respectivement fixées à 60°C et 10°C.

#### 8.2.2.3. Les appareils électriques et la cuisson

Ces deux postes énergétiques sont calculés sur base de statistiques régionales. L'ICEDD (2008) estime ainsi que chaque ménage utilise 2.827kWh par an pour les appareils électriques et 461kWh par an pour la cuisson.

#### 8.2.3. Les consommations « transport »

Les consommations annuelles pour les déplacements quotidiens des occupants ( $E_{DM}$ ) sont évaluées grâce à l'indice de performance des déplacements développés par Marique et al. (2013a et 2013b). Pour rappel, cet indice représente, en kWh par personne et par trajet, la consommation moyenne d'un habitant d'une entité territoriale donnée. Cet indice prend en compte les distances parcourues, les fréquences de déplacements et le mode de transport utilisé et se formalise selon l'équation suivante, où  $i$  représente l'unité territoriale considérée (le secteur statistique, l'ancienne commune ou la commune),  $m$  représente le mode de transport,  $D_{mi}$  représente l'ensemble des distances parcourues par les habitants de l'unité  $i$  grâce au mode de transport  $m$ ,  $f_m$  représente le facteur de consommation attribué au mode  $m$  et  $T_i$  représente la population de l'unité territoriale  $i$  considérée. Les facteurs de consommation suivants sont appliqués : 0,56 kWh/personne.km pour les voitures diesel, 0,60 kWh/p.km pour les voitures essence, 0,45 kWh/p.km pour le bus, 0,15 kWh/p.km pour le train et 0 pour le vélo et la marche à pied.

$$(4) \text{ IPE } (i) = (\sum_m D_{mi} * f_m) / T_i$$

Les consommations énergétiques annuelles, à l'échelle d'un quartier, sont obtenues en multipliant l'indice de performance par le nombre total trajets parcourus par les habitants du quartier sur une année ( $T$ ).

$$(5) E_{DM} = \text{IPE} * T$$

Les données utilisées pour calculer l'indice de performance et les consommations annuelles pour les déplacements peuvent provenir de trois sources différentes : des recensements existants (enquête socio-économique de l'INS), de valeurs moyennes disponibles à une échelle territoriale donnée ou d'une enquête in situ dans les quartiers soumis à évaluation. L'utilisation de ce dernier type de données est recommandée mais nécessite des moyens importants. Dans le cadre de l'application illustrative à deux quartiers, présentée dans la section 8.3, nous utiliserons les données de l'enquête socio-économique 2001 à titre illustratif. Ces données et résultats pourront être mises à jour ultérieurement conformément aux propositions présentées dans le chapitre 6. Remarquons que ces données ne concernent que les déplacements domicile-travail et domicile-école.

#### 8.2.4. Les énergies renouvelables

Pour l'instant, trois types d'énergies renouvelables sont considérées dans le bilan « quartier zéro-énergie ». Les développements relatifs à de nombreuses autres sources d'énergies

renouvelables et à la question de la centralisation / décentralisation de la production sont en cours de développement (voir notamment Penders (2013). Ces développements seront ultérieurement ajoutés aux présents travaux de façon à compléter et enrichir notre cadre « quartier zéro-énergie ».

#### 8.2.4.1. Le solaire photovoltaïque

Le potentiel des quartiers en termes de production électrique via des panneaux photovoltaïques est obtenu sur base de simulations réalisées à l'aide du logiciel Townscope. Dans le cadre de SOLEN, seul le potentiel en toiture est considéré, compte tenu de la faible efficacité des systèmes en façade dans un climat tel que le climat belge. Le logiciel Townscope permet d'obtenir les rayonnements directs, diffus et réfléchis sur un point ou une surface. Le logiciel considère toutefois une hypothèse de ciel serein qui n'est pas représentatif du climat belge et tend à surestimer largement le potentiel existant. Les résultats bruts issus de Townscope sont donc calibrés, sur base de l'ensoleillement moyen ( $MSR = 1.000 \text{ kWh/m}^2$ ) en Belgique et en appliquant un facteur de correction  $M$  qui provient d'un ratio entre ensoleillement en site vierge et ensoleillement en site urbanisé. Un facteur de correction  $F$  est ensuite appliqué pour prendre en compte l'orientation et l'inclinaison des toitures (voir tableau suivant).

*Tableau 31 : Facteur de correction  $F$  qui dépend de l'orientation et de l'inclinaison des toitures, pour la Belgique*

		Inclinaison de la toiture				
		0°	15°	25°	35°	50°
Orientation	Est	0.88	0.87	0.85	0.83	0.77
	Sud-est	0.88	0.93	0.95	0.95	0.92
	Sud	0.88	0.96	0.99	1	0.98
	Sud-ouest	0.88	0.93	0.95	0.95	0.92
	Ouest	0.88	0.87	0.85	0.82	0.76

L'énergie solaire reçue par la surface considérée est alors obtenue grâce à l'équation suivante :

$$(6) \quad E_{\text{SOL}} = MSR * F * M \text{ (en kWh/m}^2\text{.an)}$$

La production annuelle d'électricité par des panneaux photovoltaïques installés en toiture ( $E_{\text{PV}}$ , en kWh) est obtenue grâce à l'équation suivante où  $S$  représente la surface des toitures,  $C$  représente le pourcentage de ces toitures utilisé pour des panneaux photovoltaïques (maximum 0,80),  $\eta_{\text{pv}}$  représente l'efficacité des panneaux,  $\eta_{\text{inv}}$  l'efficacité de l'onduleur et  $\lambda$  un facteur de correction qui prend en compte les pertes électriques.

$$(7) \quad E_{\text{PV}} = E_{\text{SOL}} * S * C * \eta_{\text{pv}} * \eta_{\text{inv}} * (1-\lambda)$$

#### 8.2.4.2. Le solaire thermique

Le potentiel en termes de solaire thermique ne peut être évalué de la même façon car les systèmes photovoltaïques et thermiques présentent des spécificités. Dans le cas du solaire

thermique, l'énergie solaire reçue par les toitures est toujours obtenues par l'équation (6) ci-dessus. L'équation suivante permet ensuite de déterminer si les toitures d'un bâtiment ou d'un quartier sont adaptées à la production d'eau chaude sanitaire, via un système solaire thermique. Dans cette équation,  $E_{sol}$  représente l'énergie solaire reçue par les toits, pondérées en fonction de l'orientation, l'inclinaison et les ombrages des toitures,  $S$  représente la superficie des panneaux thermiques et  $\eta_{th}$  leur efficacité. On considère ici que 55% de la production d'eau chaude sanitaire du ménage ou de l'ensemble des ménages du quartier doit être couverte par les panneaux thermiques (d'un point de vue technico-économique, l'optimum se situe traditionnellement entre 50% et 60%). Dans ces conditions, l'efficacité des panneaux équivaut à 0,35.

$$(8) \quad E_{TH} = E_{sol} * S * \eta_{th}$$

#### 8.2.4.3. L'éolien

Le calcul rapide (des analyses plus approfondies existent et pourraient être utilisées dans la suite de la recherche, voir notamment Penders (2013) bien qu'en première approche, le calcul simplifié proposé ici suffisse) utilisé pour évaluer la production annuelle d'électricité provenant des éoliennes ( $E_{WT}$ ) consiste à multiplier la puissance nominale de l'éolienne par le nombre d'heures de fonctionnement à cette puissance nominale, selon l'équation suivante, où  $P$  représente la puissance nominale de l'éolienne et  $OH$  le nombre d'heures de fonctionnement à cette puissance.  $OH$  est fixé à 1.000 heures pour une éolienne de petite taille et compris entre 1.800 et 2.200 heures pour une éolienne offshore de grande taille.

$$(9) \quad E_{WT} = P * OH$$

#### 8.2.5. Les bilans globaux

Le bilan annuel « zéro-énergie », à l'échelle du quartier, est alors obtenu grâce à l'équation suivante

$$(10) \quad E_{SH} + E_{CL} + E_V + E_A + E_C + E_{DM} + E_{HW} - E_{PV} - E_{TH} - E_{WT} = 0$$

Pour rappel, les facteurs de conversion utilisés pour convertir les consommations et productions diverses en énergie primaire valent 1 pour le gaz naturel et le pétrole, 2,5 pour l'électricité et 1,8 pour l'électricité hydroélectrique.

Outre ce bilan annuel global, il est intéressant également d'investiguer les bilans mensuels, selon une équation similaire où les consommations et productions annuelles sont remplacées par les consommations et les productions mensuelles, pour chacun des mois considérés. Cette approche, qui sera approfondie dans la suite de la recherche, permettra notamment d'investiguer les décalages entre courbe de production et courbe de consommation et la question de l'autonomie du bâtiment ou du quartier vs. le bilan global « zéro-énergie ».

## 8.3. Application à des cas d'études

### 8.3.1. Introduction

La méthode globale présentée dans la section 8.2 a ensuite été appliquée à deux cas d'études de façon à tester son intérêt et son applicabilité avant d'envisager une systématisation sur un grand nombre de quartiers. Ces résultats (méthodes + applications) ont notamment fait l'objet d'un article accepté pour présentation orale et publication dans les actes de la conférence PLEA (Passive and Low Energy Architecture) 2013 (voir Marique et al., 2013c).

### 8.3.2. Présentation des cas d'études

Les deux cas d'études sélectionnés sont deux types de quartiers très communs en Wallonie. Il s'agit d'un quartier dense de centre-ville et d'un quartier périurbain peu dense. Ils présentent chacun approximativement le même nombre de bâtiments mais leur taux d'occupation diffère significativement. On supposera, qu'en raison de leurs différences marquées (voir tableau suivant), tant en termes de morphologie que d'occupation du sol ou d'occupation, ces deux types de quartiers nécessitent des stratégies adaptées et différenciées.

Le premier cas d'étude est un quartier dense de centre-ville (60 logements par hectare) représentatif d'un ancien tissu industriel de centre-ville. Ce quartier est localisé à proximité de nombreux services et commerces et très bien desservi en transport en commun. Les bâtiments sont anciens et peu, ou pas, isolés car le quartier a été construit au 19<sup>ème</sup> siècle et est maintenant occupé par des populations plutôt précarisées qui n'ont pas toujours les moyens d'entreprendre des travaux de rénovation et d'isolation.



*Figure 51 : le cas d'étude urbain : l'îlot Vivegnis dans le quartier Saint-Léonard à Liège*

Le second cas d'étude est un quartier périurbain peu dense situé dans la périphérie liégeoise (18 kilomètres de la gare des Guillemins). Il témoigne de l'étalement urbain qui a touché nos territoires dans les années 60 à 90. La desserte en transports en commun est très faible dans le quartier. Le quartier est composé de maisons unifamiliales, de type « 4



Tableau 32 : Principales caractéristiques des deux cas d'études

	Case 1	Case 2
Type	Urbain	Périurbain
Surface	0,97 ha	12,02 ha
Population	180 hab.	150 hab.
Bâtiments	57	55
- « 4 façades »	7%	75%
-« 3 façades »	17,5%	19,6%
- « mitoyen »	75,5%	3,6%
- appartements	0%	1,8%
Densité	60 log/ha	5 log/ha
COS	29%	5%

Dans la situation actuelle, atteindre le bilan « zéro-énergie » à l'échelle du quartier n'est pas possible, en particulier parce que les consommations liées au chauffage des bâtiments sont très élevées (184 kWh/m<sup>2</sup>.an dans le cas 1 et 235 kWh/m<sup>2</sup>.an dans le cas 2). Une différence nette peut être observée entre les besoins de chauffage des bâtiments du quartier urbain et ceux du quartier périurbains car, dans le premier cas, la mitoyenneté des formes bâties permet de minimiser ces besoins. Comme déjà mis en évidence dans la littérature relative au bâtiment « zéro-énergie », atteindre un bilan annuel « zéro-énergie » à l'échelle du quartier, implique nécessairement de réduire drastiquement au préalable les besoins et les consommations d'énergie dans le bâtiment et pour le transport.

Atteindre le standard « basse énergie » au niveau bâtiment est recommandé, dans cette optique.

Les consommations d'énergie pour le transport (qui sont ici partielles car nous n'avons pour l'instant considéré que les déplacements domicile-travail et domicile-école) sont également plus élevées dans le quartier périurbain en raison de distances parcourues plus élevées et d'une plus grande part modale de la voiture individuelle. Favoriser le report modal et les modes doux, favoriser le co-voiturage et intégrer progressivement des véhicules électriques alimentés par de l'énergie « verte » sont des actions qui pourraient utilement diminuer les consommations relatives à ce poste. Elles seront investiguées en profondeur dans les variations paramétriques de la Phase III.

		<b>Cas 1</b>	<b>Cas 2</b>
Consommation	Chauffage et ventilation: $E_{SH} + E_v$	1.421.694	2.754.341
	( $E_{SH} + E_v$ – rénovation BE)	(463.596)	(703.236)
	( $E_{SH} + E_v$ – rénovation passive)	(142.059)	(222.017)
	Appareils électriques : $E_A$	161.139	155.485
	Cuisson : $E_C$	26.277	25.355
	Eau chaude: $E_{HW}$	152.950	127.458
	Mobilité : $E_{DM}$	339.696	441.072
Prod.	Photovoltaïque: $E_{PV}$	139.945	314.669
	Eau chaude (thermique): $E_{TH}$	80.417	67.170
	Eolienne: $E_{WT}$	0	50.000

En ce qui concerne la production d'énergies renouvelables, la production photovoltaïque est plus élevée en milieu périurbain car les obstructions sont moins nombreuses, du fait de la plus faible densité bâtie. L'utilisation d'éoliennes n'est pas envisageable dans le quartier de centre-ville en raison de sa densité. Dans le quartier périurbain, la production d'électricité relative à l'implantation, en cœur d'îlot, d'une éolienne de petite taille peut théoriquement atteindre 50.000kWh annuellement. La distance aux habitations existantes est suffisante pour permettre cette implantation. Toutefois, la présence d'une éolienne en cœur d'îlot empêche la densification ultérieure de cette maille périurbaine. De plus, l'implantation et l'usage d'éoliennes posent une série de questions (nuisances, efficacité réelle, etc.) qui seront investiguées dans la suite de la recherche.

## 8.4. Discussions et perspectives

L'avantage principal de travailler à l'échelle du quartier est la « mutualisation » énergétique potentielle de la production d'énergies. Par exemple, si les panneaux photovoltaïques sont localisés uniquement sur les toitures recevant plus de 90% du rayonnement solaire maximal et si la production est mutualisée à l'échelle du quartier, l'efficacité des systèmes (kWh produit par m<sup>2</sup> de panneaux) est optimisée et augmente de 10,7% dans le cas 1 et de 5% dans le cas 2. La même quantité d'électricité pourrait ainsi être produite en minimisant la superficie des panneaux utilisés que dans les hypothèses du tableau 3 où les toits de chaque bâtiment sont mobilisés. D'autres exemples de

« mutualisation » seront investigués dans le cadre de la Phase III de la recherche (mutualisation des enveloppes, véhicules électriques partagés, etc.).

En ce qui concerne les bilans mensuels, il est important de mentionner le décalage entre la production et la consommation d'énergie et d'électricité. Dans l'optique où un bilan annuel « zéro-énergie » peut être atteint, cela ne signifie pour autant pas que le quartier est autonome, en raison de ces décalages entre production et consommation, en particulier les mois d'hiver. Le raccordement aux réseaux pour injecter le surplus de production en été et combler le manque en hiver est donc indispensable. Cette situation n'est toutefois tenable que si un petit nombre de quartiers « zéro-énergie » est présent sur le territoire. La multiplication ou la généralisation des quartiers « zéro-énergie » impose donc un travail de recherche complémentaire, notamment en ce qui concerne le stockage de l'énergie ou la combinaison de fonctions complémentaires pour équilibrer plus finement consommations et productions, à l'échelle d'un quartier ou à une échelle plus large. Ces travaux seront entrepris dans la suite de la recherche SOLEN.

## 9. Conclusions générales et perspectives

En conclusion, les résultats obtenus jusqu'à présent dans le cadre de la recherche SOLEN, en particulier ceux synthétisés dans le chapitre 8 (définition d'un cadre général pour l'étude des quartiers « zéro-énergie », définitions de méthodologies d'évaluation des différents postes considérés dans le bilan et application à des cas d'études) complètent et enrichissent les approches existantes développées à l'échelle du bâtiment. Ces premiers développements ont montré l'intérêt de notre démarche et ouvert de nombreuses pistes de recherches à investiguer dans la suite du projet SOLEN. Nous citerons en particulier l'ajout de nouveaux postes énergétiques dans le bilan global (autres modes de déplacements, autres sources d'énergies renouvelables, etc.), la question de la « mutualisation énergétique », le stockage de l'énergie et les raccordements aux réseaux, les smart grids, etc.

De nombreuses variations paramétriques seront notamment proposées dans le cadre de la phase III de la recherche de façon à compléter, enrichir et continuer les recherches entreprises jusque maintenant et investiguer les perspectives de recherches rappelées ci-dessus. Un grand nombre de ces développements pourront être intégrés directement à l'outil interactif SOLEN et le compléter ainsi d'une solide base de données relative aux énergies renouvelables, à l'échelle du bâtiment et à celle du quartier. Ces résultats feront l'objet de plusieurs publications scientifiques et seront présentés en détail dans le prochain rapport scientifique et technique du projet de recherches SOLEN.

## 10. Bibliographie

- Amado M., Poggi F. (2012). Towards solar urban planning: A new step for better energy performance. *Energy Procedia* 30: 1261-1273.
- Attia, S. (2012). Net zero Energy Buildings. Lecture in ULB. Belgium.
- Banister D., Wood C., Watson, S. 1997. Sustainable cities: transport, energy and urban form. *Environment and Planning B: Planning and Design* 24: 125-143.
- Baker N., Steemers K. (2000). *Energy and Environment in Architecture*. London: E&FN Spon.
- Bernier M 2006. Simulation de maisons « zero-net ». Journée thématique SFT-IBPSA. Chambéry
- Dujardin, S., Labeeuw, F.-L., Melin, E., Pirart, F. & Teller, J. 2010. Theme 2b. Structuration du territoire pour répondre aux objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Subvention 2009-2010. Rapport final. Conférence Permanente du Développement Territorial.
- Energie+ (2010). Conception et rénovation des bâtiments tertiaires, Architecture et climat, Université Catholique de Louvain, version 6, 2010.
- Evrard A. et al. (2012). Vade-mecum – Outils EPEEH, Evaluation du potentiel d'économie d'énergie par type d'habitat wallon, A. Evrard, C. Hermand, A. De Herde, UCL-Architecture et Climat, 2012.
- Ewing R.H., Rong F. (2008). The impact of urban form on US residential energy use. *Housing Policy Debate* 19(1).
- Feist, W. (2007). Logiciel de conception de maison passive PHPP2007. Darmstadt, Passivhaus Institut.
- Glicksman, L. R. 2003. Promoting sustainable buildings. *HVAC&R Research*, 9, 107-109.
- Goosens L., Thomas I., Vannest D. [2007]. *Enquête socio-économique 2001 - Monographie «Le logement en Belgique»* - SPF Economie, Direction générale Statistique et Information Economique (DGSIE), Politique scientifique fédérale.
- Gratia Elisabeth, André De Herde, (2002). A simple design tool for the thermal study of dwellings, *Energy and Buildings*, Volume 34, Issue 4, May 2002, Pages 411-420.
- Holden E., Norland I.T. 2005. Three challenges for the compact city as a sustainable urban form: household consumption of energy and transport in 8 residential areas in the greater Oslo. *Urban Studies* 42: 2145-2166.
- ICEDD, (2008), Bilan énergétique wallon 2008. Consommations du secteur du logement 2008, MRW, Direction générale des technologies, de la recherche et de l'énergie - Conception et réalisation ICEDD asbl, Namur.
- International Energy Agency, 2012. Net ZEBs Database, <http://iea40.buildinggreen.com>.
- Izquierdo S., Rodrigues M., Fuego N. (2008). A method for estimating the geographic distribution of the available roof surface area for large-scale photovoltaic energy-potential evaluations. *Solar Energy* 82: 929-939.
- Attia, S. G. M. (2010). "Aiming Zero Impact Buildings: Mondo Solar-2002, A case study in Belgium." *Sustainable Buildings CIB* 1.
- Jones, P., Williams, J. L. & Lannon, S. 2000. Planning for a sustainable city: an energy and environmental prediction model. *Journal of Environmental Planning and Management*, 43, 855-872.
- Kennedy S., Sgouridis S. (2011). Rigorous classification and carbon accounting principles

- for low and Zero Carbon Cities. *Energy Policy* 39: 5259-5268.
- Kints, C. (2008). La rénovation énergétique et durable des logements wallons. Analyse du bâti existant et mise en évidence des typologies de logements prioritaires, Architecture & Climat, UCL, Etude réalisée pour Ministère de la Région Wallonne (MRW-DGTRE), dans le cadre de l'IEA-SHC-Task 37 (Solar heating & cooling of Task 37).
- Maizia, M., Sèze, C., Berge, S., Teller, J., Reiter, S. & Ménard, R. 2009. Energy requirements of characteristic urban blocks. CISBAT 2009 - Renewables in a changing climate, from nano to urban scale. Lausanne, Switzerland.
- Marique, A.-F. & Reiter, S. (2010). A method to assess transport consumptions in suburban areas. Paper presented at Managing the Urban Rural Interface. Strategies and tools for Urban Development and Sustainable Peri-Urban Land Use Relationships (PLUREL), Copenhagen, Denmark.
- Marique A.-F., de Meester T., de Herde A., Reiter S. (2010). SAFE, Rapport Scientifique et Technique relatif au projet de recherches SAFE, n°2.
- Marique, A.-F. & Reiter, S. (2011). Towards more sustainable neighbourhoods: are good practices reproducible and extensible? In B. M., Evrard Arnaud (Ed.), *Proceedings of International Conference PLEA 2011 : Architecture & Sustainable Development* (pp. 27-32). Presses Universitaires de Louvain.
- Marique, A.-F. & Reiter, S. (2012). A method for evaluating transport energy consumption in suburban areas. *Environmental Impact Assessment Review*, 33, 1-6.
- Marique, A.-F. & Reiter, S. (2012b). A Method to Evaluate the Energy Consumption of Suburban Neighbourhoods. *HVAC&R Research*, 18(1-2), 88-99.
- Marique, A.-F. (2013). Méthodologie d'évaluation énergétique des quartiers périurbains. Perspectives pour le renouvellement périurbain wallon. Unpublished doctoral thesis, Université de Liège, Liège, Belgique.
- Marique, A.-F., Dujardin, S., Teller, J. & Reiter, S. (2013a). Urban sprawl, commuting and travel energy consumption. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Energy*, 166, 1-13.
- Marique, A.-F., Dujardin, S., Teller, J. & Reiter, S. (2013b). School commuting: the relationship between energy consumption and urban form. *Journal of Transport Geography*, 26, 1-
- Marique, A.-F., Penders, M., de Meester, T. & Reiter, S. (2013c). From zero-energy buildings to zero-energy neighbourhoods: Urban form and mobility matter. *Proceedings of PLEA 2013* (in press).
- Marique, A.-F., Loiseau, V., Godard, F. & Teller, J. (2013d). Référentiel quartiers durables. Ministre wallon de l'environnement, de l'aménagement du territoire et de la mobilité. (in press).
- Marszal A.J., Heiselberg P., Bourrelle J.S., Musall E., Voss K., Sartori I., Napolitano A. 2011. ZEB-A review of definitions and calculation methodologies. *Energy and Buildings* 43:971-979.
- Massart, C., A. De Herde (2010). Elaboration d'un outil d'aide à la conception de maisons à très basse consommation d'énergie, Conception de maisons neuves durables. d. I. a. Université catholique de Louvain (UCL) - SST/ILOC - Faculté d'Architecture, d'Urbanisme, Service Public Wallonie, DG04 Département de l'Energie et du Bâtiment durable: 164.
- Mlecnik, E., S. G. M. Attia and S. Van Loon (2011). "NET ZERO ENERGY BUILDING: A REVIEW OF CURRENT DEFINITIONS AND DEFINITION DEVELOPMENT IN BELGIUM." *Passive House*

## Symposium 1.

- MRW 2004. Guide d'urbanisme pour la Wallonie, Namur, Ministère de la Région wallonne, DGATLP, 227p.
- Naess P., Sandberg S.L., Roe, P.G. 1996. Energy use for transportation in 22 nordic towns. *Scandinavian Housing and Planning Research* 13: 79-97.
- Nielsen S., Möller B. (2012). Excess heat production of future net ZEB within district heating areas in Denmark. *Energy* 48(1): 23-31.
- Newman P., Kenworthy J. (1989). Gasoline consumption and cities - A comparison of UK cities with a global survey. *Journal of the American Planning Association* 55: 24-37.
- Norman J., Maclean H.L., Kennedy C.A. 2006. Comparing high and low residential density. *Journal of Urban Planning and Development* 132: 10-21.
- NORME NBN D50-001 [2008]. Dispositifs de ventilation dans les bâtiments d'habitation, Bruxelles.
- Penders, M. (2013). Rénovation énergétique des îlots. Stratégie d'intégration des énergies renouvelables dans le but de tendre vers l'objectif zéro-énergie. Thèse de master on publiée, Université de Liège.
- Sartori E., Napolitano A., Voss K. 2012. Net zero-energy buildings: A consistent definition framework. *Energy and Buildings* 48: 220-232.
- SPF economie.fgov.be, 2023. Statistique cadastrale du nombre de bâtiments au 1er janvier 2011, last accessed : April 2013.
- SPF 2012. SPF Finances. Service Public Fédéral Belge des Finances, Réduction d'impôts pour habitation basse énergie, passive et zéro énergie, <http://minfin.fgov.be>, dernier accès octobre 2012.
- Ratti C., Baker N., Steemers K. (2005). Energy consumption and urban texture. *Energy and Buildings* 37: 762-776.
- Steemers K. (2003). Energy and the city: density, buildings and transport. *Energy and Buildings* 35: 3-14.
- Teller, J. & Azar, S. 2001. Townscope II—A computer system to support solar access decision-making. *Solar Energy*, 70, 187-200.
- Thiers, S. (2008). Bilans énergétiques et environnementaux de bâtiments à énergie positive. Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris.
- Torcellini, P., Pless, S., Deru, M., Crawley, D. (2006). Zero energy buildings : a critical look at the definition. National Renewable Energy Laboratory (NREL), California, 15p.
- Todorovic M. 2012. BPS, energy efficiency and renewable energy sources for buildings greening and zero energy cities planning. *Energy and Buildings* 48: 180-189.
- Tweed, C. & Jones, P. 2000. The role of models in arguments about urban sustainability. *Environmental Impact Assessment Review*, 20, 277-287.
- Van Moeseke, G., S. G. M. Attia, C. Massart, O. Darteville and A. De Herde (2012). Proposition de redéfinition pragmatique des bâtiments net-zéro énergie. Symposium PassiveHouse. Bruxelles.
- Voss K., Musall E., Lichtmeb M. 2011. From low energy to net zero-energy buildings: status and perspectives. *Journal of Green building* 6(1): 46-57.
- Wallemacq, V, Marique, A.-F, & Reiter, S. (2011). Development of an urban typology to assess residential environmental performance at the city scale. In B. M., Evrard Arnaud (Ed.), *Proceedings of International Conference PLEA 2011 : Architecture & Sustainable Development* (pp. 119-125). Presses Universitaires de Louvain.





# 11. Table des matières

<b>1. INTRODUCTION .....</b>	<b>3</b>
<b>2. PHASE I : ETAT DE L'ART.....</b>	<b>5</b>
2.1. LE PROJET SOLEN : RAPPEL DES OBJECTIFS ET CADRAGE DE LA RECHERCHE.....	5
2.2. LES OBJECTIFS « (TRES) BASSE ENERGIE », « PASSIF » ET « ZERO-ENERGIE » : ETAT DE L'ART .....	7
2.2.1. Introduction .....	7
2.2.2. L'objectif « basse énergie ».....	8
2.2.3. L'objectif « passif » .....	9
2.2.4. L'objectif « zéro-énergie » .....	10
2.2.5. Du bâtiment au quartier, car la forme urbaine et la mobilité ont un impact !....	25
2.2.6. Synthèse et définition dans le cadre de SOLEN .....	27
<b>3. PHASE I : TYPOLOGIE .....</b>	<b>32</b>
3.1. INTRODUCTION .....	32
3.2. TYPOLOGIE DES QUARTIERS WALLONS .....	32
3.3. TYPOLOGIE DES BATIMENTS .....	41
3.3.1. Introduction et approche adoptée dans le cadre de la recherche SOLEN .....	41
3.3.2. Etat des lieux des logements en Région wallonne .....	41
3.3.3. Les typologies prioritaires de logements .....	49
3.3.4. Les caractéristiques des types de logement par aires urbanistiques .....	52
3.3.5. Conclusions.....	56
<b>4. PHASE II : RETOUR SUR L'OUTIL SAFE .....</b>	<b>57</b>
4.1. RAPPEL DES OBJECTIF DE L'OUTIL SAFE .....	57
4.1.1. Contexte dans lequel l'outil interactif SAFE a été développé .....	57
4.1.2. Description rapide de l'outil SAFE.....	58
4.2. VALORISATION ET VULGARISATION DE L'OUTIL SAFE .....	60
4.2.1. Communications scientifiques et « grand public » .....	60
4.2.2. Les retours obtenus.....	61
4.3. DONNEES DE FREQUENTATION .....	62
4.4. COMPLEMENTS APPORTES A L'OUTIL DANS LE CADRE DU PROJET SOLEN .....	63

<b>5. PHASE II : VOLET « BATIMENT ».....</b>	<b>64</b>
<b>5.1. PRE-APPROCHE DE LA MODELISATION ET DU PROCESSUS DES SIMULATIONS .....</b>	<b>64</b>
5.1.1. Première évaluation du nombre de simulations .....	64
5.1.2. Proposition d'une méthodologie de modélisation.....	65
<b>5.2. DEFINITION DES PARAMETRES DE MODELISATION .....</b>	<b>67</b>
5.2.1. Les typologies de logements testées.....	68
5.2.2. Définition et composition de l'enveloppe extérieure du logement.....	73
5.2.3. Les paramètres et leurs variations implémentées.....	77
5.2.4. Nombre de cas simulés et récapitulatif des possibilités présentes dans la base de données « bâtiment » sur le site internet.....	89
<b>5.3. CHOIX DU LOGICIEL DE SIMULATION .....</b>	<b>92</b>
5.3.1. Présentation et implémentation des paramètres de modélisation dans l'interface TRNBuild .....	92
5.3.2. Présentation, implémentation des paramètres de modélisation et calibrage de l'interface Simulation Studio .....	94
<b>5.4. TRAITEMENT DES RESULTATS ET MISE EN ŒUVRE DE LA BASE DE DONNEES « BATIMENT ».....</b>	<b>99</b>
5.4.1. Création de la base de données.....	99
5.4.2. Exploitation de la base de données.....	108
<b>6. PHASE II : VOLET « TRANSPORT » .....</b>	<b>109</b>
<b>6.1. INTRODUCTION, OBJECTIFS ET APPROCHE ADOPTEE.....</b>	<b>109</b>
<b>6.2. DANS L'OUTIL D'EVALUATION RAPIDE .....</b>	<b>109</b>
6.2.1. Dans l'outil SAFE .....	109
6.2.2. Compléments proposés dans SOLEN .....	110
<b>6.3. DANS L'OUTIL D'EVALUATION DETAILLEE .....</b>	<b>111</b>
6.3.1. Dans l'outil SAFE .....	111
6.3.2. Compléments proposés dans SOLEN .....	111
<b>6.4. DANS L'OUTIL D'EVALUATION D'UN QUARTIER .....</b>	<b>111</b>
6.4.1. Dans l'outil SAFE .....	111
6.4.2. Compléments proposés dans SOLEN .....	111
<b>7. PHASE II : VOLET « ENERGIES RENOUVELABLES » .....</b>	<b>115</b>
<b>7.1. INTRODUCTION .....</b>	<b>115</b>
<b>7.2. IDENTIFICATION DU POTENTIEL SOLAIRE .....</b>	<b>115</b>
7.2.1. Objectifs et logiciel.....	115
7.2.2. Méthode.....	116
7.2.3. Principaux résultats.....	117

7.2.4.	Valorisation et perspectives .....	117
7.3.	AVANCEMENT CONCERNANT LES AUTRES TYPES D'ÉNERGIES RENOUVELABLES .....	117
<b>8.</b>	<b><u>PHASE II : CADRE GENERAL POUR L'ÉTUDE DES QUARTIERS « (TRES) BASSE ENERGIE » ET « ZERO ENERGIE ».....</u></b>	<b>119</b>
8.1.	INTRODUCTION .....	119
8.2.	CADRE CONCEPTUEL GENERAL.....	119
8.2.1.	Introduction .....	119
8.2.2.	Les consommations « bâtiments » .....	119
8.2.3.	Les consommations « transport » .....	121
8.2.4.	Les énergies renouvelables .....	121
8.2.5.	Les bilans globaux .....	123
8.3.	APPLICATION A DES CAS D'ÉTUDES .....	124
8.3.1.	Introduction .....	124
8.3.2.	Présentation des cas d'études .....	124
8.3.3.	Résultats principaux et interprétation.....	125
8.4.	DISCUSSIONS ET PERSPECTIVES .....	126
<b>9.</b>	<b><u>CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES .....</u></b>	<b>128</b>
<b>10.</b>	<b><u>BIBLIOGRAPHIE.....</u></b>	<b>129</b>
<b>11.</b>	<b><u>TABLE DES MATIERES.....</u></b>	<b>133</b>